Canada

LA NÉO-CÉRAMIQUE

Rapport nº 3-1986

BUREAU DE L'INNOVATION INDUSTRIELLE

L'INNOVATION

Gouvernement du Canada
Expansion industrielle régionale

Government of Canada
Regional Industrial Expansion

86-05263/

LA NÉO-CÉRAMIQUE

Bureau de l'innovation industrielle
Ministère de l'Expansion
industrielle régionale
Janvier 1986

Ce rapport a été préparé par M.K. Murthy du cabinet d'experts-conseils M.K.M. Consultants International et ce, en vertu d'un contrat passé par le ministère de l'Expansion industrielle régionale pour le compte de la Direction de l'évaluation de la technologie. Tout en reconnaissant l'intérêt et la valeur du rapport préparé par M. Murthy, la Direction tient à souligner que les opinions exprimées dans le document ne reflètent par forcément celles du Ministère.

AVANT-PROPOS

Bon nombre de chefs de file de l'industrie sont d'avis que les matériaux industriels de pointe, tout comme la micro-électronique et la biotechnologie, constitueront le moteur de la prochaine révolution industrielle.

Le développement rapide de matériaux de pointe et leur utilisation accrue à l'étranger sont attribuables à des considérations d'ordre économique et stratégique. A moyen et à long terme, cette évolution aura une forte incidence sur les secteurs de l'économie canadienne traditionnellement axés sur les ressources. En outre, certains secteurs de l'industrie manufacturière canadienne connaîtront un nouvel essor grâce à l'utilisation de nouveaux matériaux, sans compter qu'il serait possible de créer de nouveaux marchés pour les matières premières canadiennes entrant dans leur fabrication.

Voici le troisième volume d'une série d'études publiées par la Direction de l'évaluation de la technologie du Bureau de l'innovation industrielle. Il analyse le potentiel et les problèmes de l'industrie canadienne de la néo-céramique sur le plan international. Ce secteur est en voie de devenir un membre de plus en plus important de la famille des techniques appliquées aux matériaux industriels de pointe.

Dans le cadre de ses efforts visant à promouvoir et à diffuser le progrès technologique, la Direction de l'évaluation de la technologie met l'accent sur la communication entre les utilisateurs possibles et les fournisseurs et sur l'instauration d'un climat favorable au progrès technologique.

Le présent rapport vise essentiellement à sensibiliser davantage le public et les entreprises au potentiel commercial qu'offre la néo-céramique. Il tente également de familiariser le lecteur avec le réseau de chercheurs travaillant dans ce domaine. Les personnes désireuses de faire partie de ce groupe ne doivent pas hésiter à communiquer avec le Bureau de l'innovation industrielle.

Bureau de l'innovation industrielle
Ministère de l'Expansion industrielle régionale
Ottawa (Ontario)
K1A 0H5
N° de téléphone: (613) 995-3741

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier toutes les personnes et toutes les organisations qui l'ont secondé au cours de la préparation de ce rapport, en particulier :

- le Bureau de l'innovation industrielle et la Direction générale de la transformation des richesses naturelles, ministère de l'Expansion industrielle régionale;
- le Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie, ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources;
- la Division de génie mécanique, l'Institut de recherche industrielle, et l'Établissement aéronautique national, Conseil national de recherches du Canada;
- le ministère des Affaires extérieures ainsi que l'ambassade du Canada à Tokyo, à Paris, à Bonn et à Stockholm;
- l'Ontario Research Foundation;
- le Centre de recherche industrielle du Québec;
- l'université Queen's
- l'université McMaster;
- l'université de la Colombie-Britannique;
- l'U.S. National Materials Advisory Board;
- l'U.S. National Bureau of Standards;
- le Centre for Ceramics Research de l'université Rutgers;
- le ministère du Commerce international et de l'Industrie, Japon.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE i

1. INTRODUCTION 1

2. MÉTHODOLOGIE 3

3. DESCRIPTION DES NÉO-CÉRAMIQUES 4

3.1 Définition 4
3.2 Classification et champ d'utilisation 5
3.3 Matériaux et technologie 8
3.3.1 Généralités 8
3.3.2 Procédés de fabrication de la céramique 8
3.3.3 Néo-céramiques structurales 19
3.3.3.1 Nitrure de silicium (Si_3N_4) 20
3.3.3.2 Sialon ($Si_{6-x}Al_xN_{8-x}O_x$) 26
3.3.3.3 Carbure de silicium (SiC) 29
3.3.3.4 Zircone (ZrO_2) 33
3.3.4 Néo-céramiques fonctionnelles 37
3.3.4.1 Généralités 37
3.3.4.2 Céramiques électroniques 37
3.3.4.3 Céramiques chimiques et biologiques 41
3.3.4.4 Céramiques nucléaires 42

4. APPLICATIONS INDUSTRIELLES 43

4.1 Généralités 43
4.2 Automobiles et autres utilisations 43
4.2.1 Avantages de l'utilisation des céramiques 43
4.2.2 État actuel du développement des moteurs 45
4.2.3 Perspectives futures 54
4.2.3.1 Problèmes technologiques 54
4.2.3.2 Réaction de l'industrie automobile 59
4.3 Outils coupants et pièces de machinerie 62
4.3.1 Historique 62
4.3.2 Outils coupants en céramique 63
4.3.3 Avantages des outils coupants en néo-céramique 63
4.3.4 Activités industrielles 64
4.4 Applications électroniques 66
4.4.1 Historique 66
4.4.2 État actuel et perspectives 68
4.5 Produits industriels 72
4.6 Produits énergétiques et spatiaux 72
4.7 Produits de consommation 72

5. POTENTIEL DU MARCHÉ ET CONCLUSION 74

5.1 Généralités 74
5.2 Données sur le marché aux États-Unis 74
5.3 Données sur le marché pour le Japon 80
5.4 Conclusion 85

6. PERSPECTIVES INTERNATIONALES 89

6.1 Généralités 89
6.2 Néo-céramiques aux États-Unis 92
6.2.1 Généralités 92
6.2.2 Programmes, politiques et initiatives du gouvernement 93
6.2.3 Activités industrielles dans le secteur des néo-céramiques 97
6.2.4 Sociétés professionnelles et techniques 100
6.2.5 Activités des universités dans le secteur des néo-céramiques 100
6.3 Néo-céramiques en Europe 101
6.3.1 Généralités 101
6.3.2 Néo-céramiques en République fédérale d'Allemagne.. 101
6.3.3 Néo-céramiques en Suède 104
6.3.3.1 Généralités 104
6.3.3.2 Programme national de la Suède 106
6.3.3.3 Activités industrielles 109
6.3.4 Néo-céramiques au Royaume-Uni 110
6.3.5 Néo-céramiques en France 112
6.4 Néo-céramiques au Japon 115
6.4.1 Généralités 115
6.4.2 Rôle et influence du gouvernement 116
6.4.3 Coordination et gestion des programmes sur les néo-céramiques par le gouvernement - Rôle du ministère du Commerce international et de l'industrie (MCII) 118
6.4.4 Examen des programmes du MCII concernant les néo-céramiques 123
6.4.5 Activités industrielles dans le secteur des néo-céramiques 125
6.4.6 Participation des universités au développement des néo-céramiques 128

7. PERSPECTIVES CANADIENNES 136

7.1 Généralités 136
7.2 Profil de l'industrie céramique canadienne 137
7.2.1 Profil de l'industrie céramique traditionnelle 137
7.3 Profil de l'industrie canadienne des néo-céramiques 137
7.3.1 Généralités 137
7.3.2 Fabricants de poudres céramiques destinées aux néo-céramiques 138
7.3.3 Fabricants de céramiques et d'éléments électroniques 140
7.3.4 Fabricants de néo-céramiques structurales et industrielles 144
7.3.5 Fabricants d'outils coupants 147
7.4 Programmes de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les laboratoires du gouvernement fédéral 150

7.5 Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les universités canadiennes 155
7.6 Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les agences de recherches provinciales 158
7.7 Avantages et désavantages pour l'industrie canadienne 161
7.7.1 Généralités 161
7.7.2 Incidence du développement international 164
7.7.3 Possibilités de débouchés dans le secteur des néo-céramiques fonctionnelles 169
7.7.4 Possibilités de débouchés dans le secteur des néo-céramiques structurales 171
7.7.4.1 Poudres céramiques 171
7.7.4.2 Utilisations autres que pour les moteurs .. 173
7.7.4.3 Utilisation dans les moteurs 173
7.8 Ouvertures, obstacles et autres solutions 175

BIBLIOGRAPHIE 180

ANNEXE A 183

ANNEXE B 189

LISTE DES FIGURES

1. Champs d'utilisation des céramiques traditionnelles 6
2. Champs d'utilisation des néo-céramiques 7
3. Applications fonctionnelles des néo-céramiques 9
4. Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications mécaniques et structurales 10
5. Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications électriques et électroniques 11
6. Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications thermiques 12
7. Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications chimiques 13
8. Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications magnétiques, optiques et biologiques 14
9. Procédés de fabrication de la céramique 16
10. Procédé de matriçage isostatique à chaud (HIP) - ASEA Ceram .. 17
11. Surface spécifique et teneur en oxygène des poudres de nitrure de silicium 23
12. Étendue des études scientifiques et technologiques pour la commercialisation des néo-céramiques 27
13. Applications industrielles des néo-céramiques 44
14. Avantages économiques découlant de l'utilisation des néo-céramiques dans les moteurs 47
15. Orientations de l'utilisation des matériaux pour les moteurs à turbine à gaz 50
16. Amélioration de l'efficacité énergétique dans les moteurs Diesel 55
17. Vitesse de coupe des outils en fonction de l'année du début de leur utilisation 65
18. Coûts de production résultant de l'utilisation de divers matériaux pour les outils coupants 65
19. Types de céramiques électroniques 69
20. Pénétration du marché pour les utilisations des néo-céramiques en vertu de divers scénarios 81
21. Données du MCII sur le marché prévu pour les néo-céramiques au Japon 87
22. Période de temps prévue pour l'introduction des éléments de néo-céramiques structurales 88
23. Niveau international relatif des efforts déployés dans la mise au point des néo-céramiques structurales 90
24. Financement de la recherche et du développement des néo-céramiques structurales par le gouvernement américain 96
25. Programme de développement des néo-céramiques structurales en Suède 108
26. Programmes de néo-céramiques parainnés par le MCII 126
27. Calendrier du programme de développement du MCII 127
28. Pressions internationales qui s'exercent sur le Canada dans la répartition du marché mondial 166

LISTE DES TABLEAUX

1. Propriétés des néo-céramiques structurales 21
2. Propriétés des matériaux céramiques de support 38
3. Avantages technologiques des céramiques pour certains types de moteurs 46
4. Orientation des programmes des fabricants de la République fédérale d'Allemagne participant au programme national 52
5. Orientation de la recherche des entreprises japonaises dans la mise au point de pièces de moteurs en néo-céramique 56
6. Eléments céramiques utilisés dans les automobiles 57
7. Principaux fournisseurs d'outils coupants en néo-céramique destinés au marché des États-Unis 67
8. Applications des céramiques électroniques 70
9. Produits industriels faits de néo-céramique 73
10. Comparaison entre les marchés des néo-céramiques, 1980 76
11. Prévision du marché mondial des néo-céramiques 76
12. Sommaire du potentiel du marché américain pour certaines pièces de céramique choisies 78
13. Variation de la pénétration du marché par les éléments de céramique d'ici l'an 2000 79
14. Livraisons américaines de néo-céramiques par types d'utilisation d'ici l'an 2000 82
15. Importance du marché des céramiques fines au Japon en 1980 et en 1982 83
16. Données prévues sur le marché des céramiques fines pour 1983 84
17. Prévisions de l'importance du marché des céramiques fines au Japon .. 86
18. Efforts internationaux actuels de recherche et de développement dans le secteur des néo-céramiques selon le type d'utilisation 91
19. Compagnies importantes des États-Unis poursuivant des travaux de recherche et de fabrication de néo-céramiques techniques 99
20. Liste des industries participant au programme national de recherches de la République fédérale d'Allemagne sur les néo-céramiques destinées aux moteurs 102
21. Budget du programme national allemand pour la période de 1974 à 1980. 102
22. Liste des universités et des laboratoires gouvernementaux travaillant sur les néo-céramiques au Royaume-Uni 113
23. Liste des industries travaillant sur les néo-céramiques au Royaume-Uni 113
24. Le gouvernement du Japon et la céramique 119

LISTE DES TABLEAUX (suite)

25. Membres de l'Association de recherches techniques sur les céramiques de haute performance 122
26. Classification des types de compagnie qui font partie de l'Association des céramiques fines du Japon 124
27. Objectifs de rendement du programme de céramiques de technologie de pointe du MCII 127
28. Importance relative de l'industrie céramique au Japon 129
29. Nombre de chercheurs par gamme de produits au Japon 130
30. Compagnies japonaises engagées activement dans le secteur des néo-céramiques 131
31. Motifs pour se lancer dans l'industrie des céramiques fines 133
32. Nombre d'étudiants dans les cycles supérieurs et de titulaires de diplômes au Japon, aux États-Unis, au Royaume-Uni, en France et en République fédérale d'Allemagne 134
33. Principales universités du Japon qui ont des programmes permanents de recherches en céramique 135
34. Fabricants de poudres céramiques destinées aux néo-céramiques 139
35. Compagnies fabriquant des néo-céramiques et des éléments électroniques 142
36. Compagnies fabriquant des néo-céramiques structurales et industrielles 146
37. Fabricants canadiens d'outils coupants 149
38. Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les laboratoires du gouvernement fédéral 151
39. Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les universités canadiennes 157
40. Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les agences de recherches provinciales 160
41. Ouvertures dans le secteur des néo-céramiques fonctionnelles pour l'industrie canadienne 170

SOMMAIRE

CONTEXTE

Le terme " céramique " désigne un grand nombre de substances inorganiques. La définition courante et généralement acceptée est la suivante : " substance obtenue à partir de matières inorganiques non métalliques, généralement par chauffage à haute température ". On compte deux types de céramique, la céramique traditionnelle et la néo-céramique.

Au nombre des produits céramiques traditionnels, citons la poterie, la vaisselle, les appareils sanitaires, la brique, les matériaux isolants, les produits réfractaires et le verre. Ces articles sont en usage depuis des générations.

Quant aux néo-céramiques, elles englobent diverses substances inorganiques composées notamment d'oxydes, de carbures, de nitrures et de graphite. La révolution dans le domaine de la néo-céramique s'est amorcée voici plus de dix ans pour répondre à d'importants besoins industriels dans le domaine des matériaux offrant des propriétés mécaniques, thermiques, électriques, chimiques et optiques supérieures, lesquels donneraient le ton au progrès technologique en rendant les produits et les procédés plus concurrentiels, plus fiables et moins coûteux. A ce jour, les réalisations industrielles, notamment en ce qui touche la mise au point et la commercialisation de composantes et de matériaux utilisés en électronique, ont été remarquables. En 1980, ces produits représentaient 70 % des ventes mondiales de néo-céramiques qui totalisaient alors 4,25 milliards de dollars US*. Le Japon accapare de très loin la part du lion avec près de 70 % de ce marché.

L'énorme potentiel du marché mondial des néo-céramiques, évalué à 30 milliards de dollars d'ici l'an 2010, explique le grand intérêt qu'il suscite à l'échelle internationale. Les progrès scientifiques et technologiques réalisés à ce jour illustrent à la fois la faisabilité de certaines applications de la néo-céramique et son potentiel sur le plan économique, social et environnemental. Au nombre des exemples, citons la production de pièces d'automobiles, les outils à découper, les pièces de machinerie et d'équipement industriel résistant à l'usure et à la corrosion, les applications de l'opto-électronique au domaine des communications et les détecteurs utilisés à des fins de détection et de contrôle.

Les secteurs de la mise au point et de la commercialisation des composantes en néo-céramique font l'objet d'une forte concurrence à l'échelle internationale. Les États-Unis, le Japon, la République fédérale d'Allemagne et la Suède se sont déjà dotés de stratégies nationales et ont affecté des ressources et des investissements importants. Le Royaume-Uni, la France et l'Italie commencent tous trois à s'y intéresser activement et le Royaume-Uni devrait bientôt adopter une stratégie nationale. De son côté, le Canada est désavantagé en raison du fait qu'il est l'un des rares pays occidentaux industrialisés à ne pas disposer d'une telle stratégie.

---

* Sauf indication contraire, toutes les sommes sont exprimées en dollars US.

Les pays qui se sont intéressés au domaine de la néo-céramique l'ont surtout fait pour des raisons économiques. Ainsi, l'industrie cherche à préserver son avantage technologique sur les marchés intérieurs et à réduire ses coûts d'énergie et sa dépendance à l'égard des importations de matériaux stratégiques. Le potentiel offert par la néo-céramique en ce qui concerne la croissance des industries de pointe existantes et futures constitue un autre facteur important.

Dans certains cas, la néo-céramique peut donner de meilleurs résultats que les métaux ou les polymères, et l'on peut s'attendre à ce qu'elle les remplace dans une certaine mesure. Elle est déjà utilisée dans plusieurs secteurs industriels, notamment les transports, la fabrication, l'électronique, les communications et l'énergie. Cette diversité d'applications laisse croire que même une modeste percée sur les marchés pourrait grandement affecter la plupart des industries. On s'attend donc à ce qu'une plus vaste utilisation de la néo-céramique à l'échelle internationale nuise grandement aux fournisseurs traditionnels canadiens de matériaux industriels. En revanche, quelques entreprises prospéreront. En outre, certains secteurs de l'industrie canadienne pourraient bénéficier d'un second souffle grâce à l'utilisation de la néo-céramique. Qui plus est, le secteur canadien de la production de matières premières servant à la fabrication de composantes à base de néo-céramique pourrait disposer de nouveaux marchés.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

La néo-céramique sert habituellement de composante. On lui connaît six champs d'application :

- l'électronique,
- les moteurs pour automobiles et autres appareils,
- les outils à découper et les pièces de machines,
- les produits industriels,
- les produits de consommation,
- l'énergie et le domaine spatial.

L'électronique

La production commerciale de dispositifs électroniques s'est sensiblement accrue depuis la fin des années cinquante. Les marchés pour ces produits se développent rapidement et leur croissance devrait être excellente, dépassant 15 % par année. A l'heure actuelle, la néo-céramique est surtout utilisée dans la fabrication de circuits intégrés, de condensateurs et de résistances. Au nombre de leurs nouvelles applications, citons les détecteurs et les dispositifs optiques intégrés. Par ailleurs, la demande de détecteurs est en hausse dans les domaines de la robotique, de la construction automobile, des dispositifs de mesure et de contrôle de l'environnement, de l'automatisation, des implants chirurgicaux et des autres produits destinés tant à l'industrie qu'aux consommateurs. On prévoit en outre que les dispositifs optiques intégrés, qui servent à guider et à orienter des ondes radioélectriques, devraient jouer un rôle de premier plan dans le domaine des systèmes de communication utilisant les fibres optiques.

Les moteurs pour automobiles et autres appareils

Les composantes de néo-céramique à base de nitrure de silicium (Si_3N_4), de carbure de silicum (SiC) et de zircone, aussi appelée oxyde de zirconium, (ZrO_2) sont utilisées depuis le début des années soixante-dix dans la fabrication de turbines à gaz et de moteurs Diesel et à essence. Les facteurs économiques et techniques qui stimulent les vastes efforts déployés sont le besoin d'un plus grande efficacité énergétique, la possibilité d'utiliser plus d'un type de carburant, la réduction du coût des composantes et une moindre dépendance à l'égard des matières premières importées.

A ce jour, on a consacré plus de 500 million de dollars, à l'échelle mondiale, à la mise au point de matériaux et à la technologie afin d'en démontrer la viabilité sur le plan technique. Des essais réussis de moteurs réalisés aux États-Unis, au Japon, en République fédérale d'Allemagne et en Suède en accélèrent la commercialisation. D'ailleurs, le Japon a déjà lancé diverses pièces de moteurs Diesel et des prototypes de turbopropulseurs sont en cours de production. On s'entend généralement sur le calendrier suivant :

Période	Réalisation
1984 - 1987	Pièces en céramique
1987 - 1990	Composantes en céramique
1990 - 1995	Systèmes
1995 - 2000	Petits moteurs à turbine à gaz

En dépit de leurs succès, les experts doivent encore affronter de graves problèmes, notamment en ce qui touche la production en série, la fiabilité du service et les coûts. Ils sont toutefois confiants de trouver des réponses satisfaisantes dans les délais fixés.

Outils à découper et pièces de machines

Il s'agit là d'un autre domaine où l'utilisation de la néo-céramique est de plus en plus courante, surtout en raison de sa dureté, de sa durabilité et de sa résistance aux températures élevées. Ainsi, on utilise maintenant en milieu industriel des outils à découper à base de nitrure de silicium, puisqu'ils supportent de plus hautes vitesses, ce qui réduit les coûts d'usinage et accroît la productivité. Les coûts de production peuvent même être réduits de 60 à 75 % par rapport au total. Qui plus est, la prolifération des machines-outils à commande numérique, dont la fiabilité et les performances influent grandement sur les coûts de production et la productivité, rend l'utilisation d'outils à découper en néo-céramique presque obligatoire. On estime que les pertes attribuables à l'usure et à la corrosion des pièces de métal présentement en usage aux États-Unis, représentent plus de 10 milliards de dollars par année. C'est pourquoi les composantes de néo-céramique comme les scellants, les roulements à billes et les revêtements servant à préserver les pompes de la corrosion sont de plus en plus répandues.

Produits industriels

Il existe de nouvelles applications pour la néo-céramique à base de nitrure de silicium, de carbure de silicium et de zircone, en raison de sa résistance à la corrosion. En ce qui concerne les secteurs de la transformation du fer, de l'acier, de l'aluminium et d'autres métaux non ferreux, elle sert à fabriquer des embouts, des rouleaux pour convoyeurs, des vannes à glissières, etc. Dans le secteur de la transformation des produits chimiques et des industries connexes, elle entre dans la fabrication d'échangeurs de chaleur et de régénérateurs. Les entreprises des secteurs pétrolier et gazier l'emploient comme composante de dispositifs utilisés en présence de produits très corrosifs. Au nombre des autres principales applications, citons les brûleurs d'appareils alimentés au charbon pulvérisé, les embouts utilisés pour la soudure, le décapage au jet de sable et le séchage sous pression, les ventilateurs fonctionnant à haute température dans les chaudières, l'extrusion des métaux, la production de fils métalliques, de radiateurs spéciaux et de gabarits de précision utilisés pour fabriquer des composantes électroniques.

Produits de consommation

Le marché des produits de consommation se développe rapidement, surtout au Japon. Au nombre des produits déjà disponibles, citons les ciseaux, les couteaux, les pièces de bâtons de golf, les cannes à pêche, les composantes de rasoirs électriques et les lames de patins.

L'énergie et le domaine spatial

Les néo-céramiques entrent dans la fabrication des accumulateurs, des cellules énergétiques et des collecteurs d'énergie solaire industriels, des boucliers de chaleur, des dispositifs de prévention de l'érosion par l'eau, des radômes et des fenêtres à l'épreuve des rayons ultra-violets et d'autres produits utilisés dans le domaine aérospatial.

POTENTIEL DU MARCHÉ

Les données commerciales fournies par le ministère du Commerce international et de l'Industrie du Japon (MCII) et par le US Department of Commerce sont résumées ci-dessous. Des renseignements comparables sur les autres pays du monde ne sont pas disponibles.

Pays	1990	2000
	(en milliards de dollars de 1980)	
Japon	5,2 - 7,2	11,2 - 16,8
États-Unis	2,5 - 3,2	5,0 - 7,5
TOTAL	7,7 - 10,4	16,2 - 24,3

Les données portant sur le Japon ont trait au total des ventes sur le marché intérieur et extérieur, alors que dans le cas des États-Unis, il ne s'agit que des ventes sur le marché intérieur. Ces deux séries de statistiques traduisent deux grandes incertitudes. En premier lieu, certaines techniques ne sont pas encore au point et la solution de plusieurs problèmes techniques n'est pas imminente. Deuxièmement, dans la plupart des cas, la néo-céramique fera concurrence à d'autres techniques solidement établies et basées sur les métaux. Le taux de pénétration des marchés dépendra donc de la comparaison des avantages et des coûts respectifs des divers matériaux.

On s'attend à ce que les domaines de l'électronique et d'autres champs d'application de la néo-céramique (détecteurs, dispositifs optiques intégrés, biocéramique) accaparent la majeure partie de la croissance que l'on constatera au cours des prochaines décennies. Au Japon, le MCII prévoit que la néo-céramique industrielle entrant dans la fabrication des pièces et des composantes de moteurs, des pièces de rechange, des outils à découper, etc. représentera à peine 25 % du marché. Voici la répartition prévue du marché nippon.

Année	Électronique	Autres secteurs industriels
	(en milliards de dollars de 1980)	
1988	3,0	1,0
1990	3,9 - 5,4	1,3 - 2,8
2000	8,4 - 12,6	2,8 - 4,2

La tendance prévue dans le cas du marché américain est à peu près identique. Ainsi, en l'an 2000, la néo-céramique utilisée dans le domaine de l'électronique représentera 47 % (3,5 milliards de dollars) d'un marché total évalué à 7,5 milliards.

On s'attend pour dire qu'à long terme, soit au cours des 10 ou 20 prochaines années, les perspectives du marché des moteurs seront bonnes et que celui-ci pourrait même représenter 7 milliards de dollars d'ici l'an 2000, rien qu'aux États-unis et au Japon. A court terme, soit d'ici cinq ans, les fabricants de pièces et de composantes en néo-céramique devront sans doute effectuer d'importants investissements, vu que la production demeurera faible et les coûts de production élevés. Les perspectives économiques devraient toutefois s'améliorer à moyen terme, soit entre cinq et dix ans, eu égard aux progrès technologiques escomptés, ce qui permettra d'améliorer l'efficacité des méthodes de fabrication.

Afin de récupérer en partie leurs importants investissements, les fabricants de pièces et de composanes en néo-céramique assurent la commercialisation des techniques et des matériaux courants utilisés dans la fabrication de produits autres que les moteurs, notamment les produits industriels (régénérateurs, échangeurs de chaleur et pièces résistantes à l'usure et à la corrosion), les produits de consommation (couteaux, ciseaux, équipement de sport et produits domestiques) et les produits spécialisés (prothèses, notamment les fausses dents, les hanches et les os artificiels).

Il ne fait aucun doute que la néo-céramique jouera un rôle important sur le plan des économies nationales au cours des prochaines années. Les entreprises autres que celles de fabrication de céramique ont d'ailleurs commencé à investir dans ces matériaux perfectionnés. Ainsi, les secteurs des textiles, de la pétrochimie et des métaux souhaitent utiliser la technologie existante pour bénéficier d'une plus grande valeur ajoutée, mettre au point des produits plus rentables et améliorer la qualité de ceux qu'ils offrent déjà. Dans d'autres industries, l'utilisation de la néo-céramique devient rapidement non plus une option, mais une nécessité. Pour être concurrentielles, les entreprises de transformation et d'assemblage se doivent de mettre elles-mêmes au point de nouveaux matériaux. Cette tendance est déjà bien établie au Japon et se répand progressivement aux États-Unis et en Europe.

PERSPECTIVE INTERNATIONALE

Il y a une importante raison financière qui explique la vive concurrence internationale pour ce qui est de mettre au point les techniques propres à la néo-céramique et de les commercialiser. D'ici l'an 2010, le marché mondial dans ce domaine représentera 30 milliards de dollars. A cela s'ajoute près de 60 milliards sous forme de retombées sur le plan de la productivité et des économies d'énergie. Les initiatives à frais partagés entre l'industrie et le gouvernement ont permis aux États-Unis, au Japon, à la République fédérale d'Allemagne et à la Suède d'occuper les premières places au chapitre de la recherche, du développement et de la commercialisation. La Grande-Bretagne et, bien qu'à moindre échelle, la France et l'Italie, se sont jointes au groupe. Il y a probablement plus de 2 000 chercheurs et ingénieurs travaillant dans le domaine de la néo-céramique au Japon, avec l'appui d'autant de techniciens. On compte près de 1 000 chercheurs et ingénieurs oeuvrant en R et D axés sur la néo-céramique aux États-Unis et entre 1 000 et 2 000 autres évoluant dans des domaines connexes. En Europe, on ne dénombre guère plus de 500 spécialistes dans ce domaine et entre 50 et 100 seulement au Canada.

États-Unis

Les États-Unis sont un chef de file mondial en matière de recherche, de développement et de commercialisation de la néo-céramique depuis les années cinquante. Les travaux de R et D portant sur les applications de la néo-céramique à la construction de moteurs profitent du plein appui du gouvernement depuis les années soixante-dix. Jusqu'ici, plusieurs projets pilotes ont été menés à bien et, à lui seul, le gouvernement y a affecté plus de 300 millions de dollars. A l'heure actuelle, l'industrie et le gouvernement s'inquiètent sérieusement du fait qu'en dépit du dynamisme manifesté sur le plan scientifique et technologique, le volet " commercialisation " affiche un certain retard.

Plusieurs organismes gouvernementaux, notamment la NASA et les ministères de la Défense et de l'Énergie, financent des travaux de R et D, de laboratoires privés et internes portant sur la néo-céramique. L'appui total du gouvernement à ce titre est évalué à près de 100 millions de dollars par

année. L'industrie américaine, et notamment 100 grandes entreprises, y consacre elle aussi 100 millions de dollars annuellement. Au nombre des raisons justifiant l'accroissement de l'aide, citons les suivantes :

- l'incidence négative sur l'industrie attribuable à la concurrence du Japon, de la République fédérale d'Allemagne et de la Suède;

- les besoins en matière de défense et les considérations relatives à la sécurité nationale, y compris la dépendance à l'égard des matériaux stratégiques;

- les économies réalisables grâce à l'utilisation efficace de l'énergie.

Trois études menées par le gouvernement ont récemment fait état du besoin de modifer la politique officielle. Elles réclament la prestation d'un appui plus direct au secteur de la néo-céramique industrielle afin de faire échec à la concurrence internationale, notamment celle du Japon. Le gouvernement cherche également à promouvoir la création de centres de recherche universitaires œuvrant dans ce domaine, et un centre d'envergure nationale a été mis sur pied au laboratoire national d'Oak Ridge.

Japon

La mise au point et la commercialisation de techniques de pointe comportant une importante valeur ajoutée, notamment celles qui ont trait à la néo-céramique, constituent le moteur de la stratégique industrielle nippone. L'industrie et le gouvernement travaillent d'ailleurs de concert pour en assurer le succès. L'intérêt et l'engagement de l'industrie reposent sur les forces du marché, notamment en ce qui a trait au besoin de disposer de ces matériaux pour appuyer d'autres secteurs de pointe, et à l'énorme potentiel qu'offre le marché des moteurs. De son côté, le gouvernement y participe parce qu'il est convaincu que la néo-céramique permettra de résoudre un grand nombre des problèmes d'approvisionnement en énergie que connaît le Japon, tout en appuyant le développement de nouvelles industries comme la recherche de substituts du pétrole, l'aérospatiale, l'exploration spatiale, la biotechnologie et l'électronique. Le gouvernement reconnaît également que les travaux menés dans le domaine de la néo-céramique peuvent donner naissance à de nouvelles industries.

Chef de file mondial dans le domaine de la néo-céramique, le Japon a mis en œuvre une campagne nationale concertée afin de préserver son avance sur la scène internationale. De récentes estimations évaluent sa part du marché mondial à 50 %. Le pays a déjà commencé à fabriquer des composantes de céramique pour moteurs Diesel (300 000 bougies de préchauffage et 20 000 chambres de précombustion par mois). Les entreprises et les banques nippones se sont d'ailleurs engagées à assurer leur réussite en se dotant de stratégies d'achat et de fixation des prix et en mettant sur pied de vastes programmes de formation afin de disposer d'un personnel technique compétent. Il semble donc que les Japonais soient prêts à attendre plus longtemps qu'une nouvelle industrie de pointe se développe et devienne rentable que ne le sont les entreprises d'Europe et des États-Unis. Le Japon occupe déjà le premier rang

au titre des investissements en matière de R et D axé sur la néo-céramique, tant sur le plan des effectifs que des ressources financières. Ainsi, le gouvernement y consacre environ 50 millions de dollars par année, contre 100 à 250 millions pour l'industrie.

Le ministère du Commerce international et de l'Industrie (MCII) dirige la participation du gouvernement nippon par l'intermédiaire du Bureau de la néo-céramique. Plusieurs laboratoires relevant du MCII appuient les travaux de R et D de l'industrie et le ministère a adopté un certain nombre de mesures afin de promouvoir l'utilisation de la néo-céramique au Japon.

L'intérêt de l'industrie à l'égard de la néo-céramique se reflète dans la gamme d'entreprises faisant partie de la Japan Fine Ceramics Association. Ainsi, 41 des 172 sociétés membres fabriquent des produits de céramique, 41 œuvrent dans le domaine de la chimie, 25 produisent des appareils ménagers, 23 sont actives dans le secteur de l'acier et des métaux non ferreux, 23 autres en font autant dans celui de la machinerie, 7 relèvent du secteur de l'automobile, 7 produisent de l'équipement lourd et 14 autres évoluent dans d'autres secteurs.

République fédérale d'Allemagne

Un programme national de R et D a été mis en oeuvre entre 1974 et 1983 afin de mettre au point des composantes en néo-céramique entrant dans la fabrication de moteurs d'automobiles et aux fins d'autres applications faisant appel à un rendement élevé. Cette initiative regroupant le gouvernement, l'industrie, les universités et les centres de recherche disposait d'un budget total de 33 millions de dollars. Le gouvernement et l'industrie ont absorbé chacun la moitié des coûts. Trois constructeurs de moteurs d'automobiles, Volkswagen, Daimler Benz et MTU, et sept fabricants de produits céramiques ont participé au programme.

Un nouveau programme de 10 ans à frais partagés entre le gouvernement et l'industrie axé sur la mise au point de matériaux de pointe (céramique, métaux pulvérisés, composés et produits résistants aux températures élevées) a été lancé récemment. Il est doté d'un budget annuel de 23 millions de dollars. Une somme de 4,7 millions a également été allouée aux projets axés sur les effets de la corrosion et de l'usure. Quant au montant exact affecté à l'ensemble des travaux portant sur la néo-céramique, il n'est pas encore disponible.

Suède

Après l'Allemagne, la Suède est le pays d'Europe le plus actif dans le domaine de la mise au point de la néo-céramique entrant dans la fabrication de moteurs, notamment en raison de l'importance de son industrie automobile. Lancé en 1976, le programme national suédois est une initiative dont les coûts sont partagés entre l'industrie, le gouvernement et les universités. Environ 14 entreprises y participent, dont Volvo, SAAB-SCANIA et ASEA. Quelques-unes des réalisations sont sur le point d'être commercialisées.

Royaume-Uni

Le Royaume-Uni s'est lancé dans la mise au point de produits de néo-céramique destinés à la fabrication de moteurs au début des années soixante. Bien que ce fut une réussite sur le plan technologique, les travaux furent interrompus par la suite en raison du faible potentiel du marché. Or, l'industrie et le gouvernement reconnaissent aujourd'hui le besoin de prendre un nouvel engagement national dans le domaine de la néo-céramique. Le Royaume-Uni ne peut se permettre d'être à la remorque de ses concurrents. L'accroissement des investissements au titre de la R et D devrait permettre à l'industrie de rattraper rapidement ses concurrents étrangers, et donc de récupérer sa part du marché international. Deux clubs industriels ont été mis sur pied à cette fin. L'un, le Rolls Royce Club, est un consortium de 10 entreprises qui mettra au point des moteurs à turbines alimentées au gaz au cours de la période allant de 1985 à 1988, à l'aide d'une subvention de 11 millions de dollars du gouvernement. L'autre, le Consortium for Ceramic Applications in Reciprocating Engines, regroupe près de 20 sociétés, notamment des constructeurs automobiles et des fabricants de pièces de rechange et de produits en céramique. Le gouvernement a déjà approuvé ce programme, mais le budget dont il disposera demeure inconnu.

France

La France ne dispose pas d'un programme national en matière de néo-céramique. En revanche, plusieurs entreprises œuvrent dans ce domaine. L'aide financière disponible provient d'organismes gouvernementaux, notamment des ministères de l'Industrie et de la Défense. Les universités et les centres de recherche participent également aux travaux.

LA PERSPECTIVE CANADIENNE

Si l'on se fie aux progrès enregistrés à l'échelle internationale qui sont exposés ci-dessus, il est évident que les pays qui auront la plus forte incidence sur le Canada sont le Japon, en raison de son avance sur le plan technologique, et les États-Unis, puisqu'il s'agit de notre principal partenaire commercial. Les faits exposés dans cette étude sur la néo-céramique et son potentiel commercial débouchent sur cinq grandes conclusions qui toucheront l'industrie canadienne et influeront sur le bien-être économique et social du pays.

1) **Un énorme potentiel de croissance s'offre aux entreprises existantes œuvrant dans le domaine de la néo-céramique, tant pour ce qui est de répondre à la demande croissante sur le marché intérieur que de créer des marchés d'exportation.**

   L'industrie canadienne de la néo-céramique repose sur un grand nombre d'entreprises allant des fabricants de poudre de céramique aux fournisseurs primaires et secondaires de composantes, de produits et de pièces. Bien que la plupart des grandes sociétés soient des filiales de multinationales, on compte également près de 50 petites et moyennes entreprises susceptibles de bénéficier de la stimulation de la mise au point et de l'utilisation de la néo-céramique.

2) **La néo-céramique jouera un rôle de soutien vital dans la croissance des secteurs de pointe comme l'électronique, l'informatique, les télécommunications, l'exploration spatiale, la robotique et la biotechnologie.**

Jusqu'à ce jour, la prospérité du Canada reposait essentiellement sur l'exploitation de ses richesses naturelles. Toutefois, les pressions économiques obligent maintenant le pays à se tourner vers les industries de pointe afin de disposer de produits comportant une plus grande valeur ajoutée et des besoins en énergie plus faibles et requérant des investissemens importants. Le Japon a démontré que la néo-céramique pouvait servir de plaque tournante du développement des entreprises et des produits de pointe existants ainsi que dans la création de nouveaux. Les possibilités sont d'ailleurs particulièrement bien adaptées aux petites entreprises qui peuvent percer sur des marchés trop restreints pour les grandes sociétés.

3) **La néo-céramique représente la meilleure solution à long terme des problèmes en matière d'approvisionnement en énergie et de ceux du secteur des ressources naturelles.**

Les problèmes se présentent sur deux fronts. Ainsi, les marchés des produits tirés des ressources naturelles du Canada se résorbent, en raison de la concurrence que nous livrent les pays en voie de développement dont les coûts de main-d'œuvre sont inférieurs. En outre, on s'attend à ce que les matériaux de néo-céramique accaparent une part appréciable du marché actuel des métaux, exerçant ainsi encore plus de pression sur le secteur des ressources naturelles. Il serait toutefois possible pour ces entreprises de fournir des matières premières comportant une plus grande valeur ajoutée afin de desservir l'industrie mondiale de la néo-céramique, laquelle est en pleine croissance. En outre, l'abondance et le coût relativement faible de l'énergie au Canada constitue un autre avantage susceptible d'être exploité afin d'améliorer notre compétitivité à l'échelle internationale.

4) **L'utilisation de la néo-céramique permettra à bon nombre d'entreprises manufacturières d'accroître leur productivité.**

Les améliorations apportées aux outils à découper devraient en accroître la productivité de 100 à 200 %. Les quelque dix entreprises canadiennes qui œuvrent dans ce secteur pourraient donc participer à la mise au point d'outils faisant appel à la néo-céramique. Par ailleurs, l'utilisation de composantes et de produits capables de résister à l'usure et à la corrosion devrait également accroître la productivité de la machinerie et de l'équipement en réduisant le temps de panne.

5) **Tout comme aux États-Unis, au Japon et en Europe, la néo-céramique permet aux industries canadiennes de se développer et de se diversifier.**

Les entreprises des secteurs du textile, des produits chimiques, des métaux, de la transformation et de l'assemblage peuvent tirer profit de la diversification de leurs activités pour englober la fabrication de matériaux de céramique en tant que composantes ou de produits finis. Les fabricants de pièces automobiles sont particulièrement avantagés à cet égard, vu l'accroissement prévu de l'utilisation de pièces, de composantes et de systèmes à base de céramique dans cette industrie.

Le Canada est en bonne position pour profiter de l'éventuelle révolution dans le domaine des matériaux. Il dispose déjà de deux atouts importants : une base industrielle viable dans le domaine de la néo-céramique et de bons programmes de R et D. On peut également compter sur la solide expertise du personnel technique œuvrant dans l'industrie, les universités, les organismes de recherche provinciaux et les laboratoires du gouvernement fédéral.

Cette réserve d'expérience et de connaissances est considérable. Bien qu'ils ne soient pas assez nombreux pour bénéficier d'un important programme en matière de R et D, les néo-céramistes le sont toutefois suffisamment pour maintenir un niveau d'activité équilibré dans certains domaines. La véritable question qui se pose au Canada a trait à son leadership et à son engagement. En effet, il ne s'agit pas de savoir si le Canada **devrait** oui ou non investir dans le développement d'une industrie de la néo-céramique, mais bien s'il peut se permettre de **ne pas** le faire.

POSSIBILITÉS, OBSTACLES ET OPTIONS

Possibilités

L'industrie canadienne peut percer sur les marchés internationaux de la néo-céramique en exploitant les débouchés suivants :

- ° la néo-céramique " fonctionnelle ", utilisée notamment dans les domaines de l'électronique, des dispositifs intégrés, des fibres optiques, des détecteurs et des implants chirurgicaux;

- ° la néo-céramique industrielle utilisée dans des secteurs autres que la production de moteurs, notamment à des fins industrielles et dans la fabrication d'outils à découper et de produits de consommation et de produits liés aux loisirs;

- ° la néo-céramique industrielle entrant dans la fabrication de moteurs et de produits connexes.

Les débouchés commerciaux les plus immédiats relèvent de la néo-céramique " fonctionnelle " et de la néo-céramique industrielle utilisée dans la production de moteurs. Le marché de ces produits est bien établi et son taux de croissance prévu au cours des deux prochaines décennies dépasse les 15 %. En outre, vu l'importance considérable de la base industrielle et des programmes de R et D existants, des progrès pourraient être enregistrés bientôt et ce, à un coût relativement peu élevé. Plusieurs multinationales œuvrent déjà dans ce domaine et les forces du marché devraient favoriser sa croissance. La néo-céramique fonctionnelle offre donc un excellent potentiel commercial aux petites entreprises canadiennes.

Le marché de la néo-céramique utilisée à des fins autres que la construction de moteurs est plus diversifé et requiert des approches novatrices pour assurer la commercialisation des produits. Ce domaine est toutefois en expansion rapide, eu égard aux avantages qu'offre le remplacement des produits dans le cadre des applications courantes au chapitre des coûts et de la performance. Ce domaine intéresse tout particulièrement les petites entreprises, ce qui n'empêche pas les grandes sociétés œuvrant dans les domaines des produits chimiques, de l'acier, de l'aluminium, des textiles et d'autres secteurs de fabrication d'y investir, ne serait-ce que pour répondre à leurs propres besoins. L'un des domaines offrant des débouchés particulièrement intéressants à court terme est celui des outils à découper.

Les problèmes d'ordre technologique et économique liés à la commercialisation de la néo-céramique industrielle entrant dans la fabrication de moteurs sont énormes. C'est pourquoi, les constructeurs automobiles d'Amérique du Nord font preuve d'attentisme, bien qu'on s'attende à ce qu'ils réagissent sans tarder si les Japonais parviennent à résoudre certaines difficultés. La pénétration et le développement des marchés prendra donc au moins cinq ans. En outre, la concurrence venant des entreprises qui investissent dans des programmes de R et D dans ce domaine depuis près d'une décennie sera vive. Les perspectives à court terme de l'industrie canadienne dans ce domaine ne sont pas très encourageantes. A moyen terme, soit dans 5 ou 10 ans, et au-delà, le marché devrait se développer sensiblement. De toute façon, seules les entreprises capables d'investir de fortes sommes à long terme dans ce secteur devraient tenter leur chance, notamment celles qui entretiennent des rapports avec les constructeurs automobiles.

L'abondance des matières premières et le coût relativement faible de l'énergie constituent une occasion unique pour les fabricants de poudre de céramique de se développer et pour de nouvelles entreprises de percer dans ce domaine, notamment celles du secteur des produits chimiques. L'avenir du Canada est particulièrement prometteur pour trois raisons.

Premièrement, il est urgent de disposer de sources économiques et fiables de poudres de céramique pour minimiser le coût global de production de la néo-céramique. Deuxièmement, le Canada peut faire des pas de géant sur le plan du développement technologique grâce à des travaux novateurs en matière de R et D et au transfert de la technologie. Troisièmement, et c'est la raison principale, le nombre de fabricants de poudres de céramique intéressés est relativement faible. Les fournisseurs canadiens ont donc les coudées franches pour pénétrer ce marché en pleine expansion.

Obstacles

Il faudra franchir certains obstacles pour profiter pleinement des possibilités décrites plus haut. Les principaux problèmes sont les suivants :

- mettre au point ou acquérir de la technologie;
- inciter les multinationales à se développer ou à mettre sur pied de nouvelles entreprises;

- aider les petites entreprises, notamment au chapitre du développement des marchés;
- recruter le personnel technique requis.

L'acquisition de la technologie constitue sans doute le problème le plus épineux. Jusqu'ici, presque toutes les innovations technologiques sont protégées par des brevets. Le transfert de cette technologie à l'aide de contrats de licence constitue donc un excellent point de départ. En raison du peu de ressources humaines et financières dont il dispose, le Canada ne peut mettre sur pied un programme de base en matière de R et D. Il y a plutôt lieu de circonscrire et d'exploiter certains débouchés commerciaux.

Bien que le Canada jouisse d'une base relativement solide dans le domaine de la R et D à l'échelle des universités, des organismes de recherche provinciaux et des laboratoires du gouvernement fédéral, il n'existe aucun programme d'envergure nationale comportant des objectifs à long terme. Certes, les multinationales et les grandes sociétés canadiennes ne s'en portent pas plus mal parce qu'elles ont accès aux diverses techniques utilisées par les sociétés mères ou en vertu de contrats de licence. En revanche, les entreprises de moindre envergure, qui profiteraient grandement d'un tel programme, sont lésées.

La taille réduite du marché canadien de la néo-céramique, par rapport à celui des États-Unis et du Japon, risque de décourager les multinationales d'investir au Canada. Par contre, le pacte canado-américain de l'automobile, l'accord sur les achats de matériel de défense conclu avec les États-Unis, le coût relativement faible de notre main-d'œuvre et l'abondance de notre énergie sont autant de raisons permettant d'inciter ces entreprises à investir au Canada.

Presque toutes les petites entreprises consultées dans le cadre de cette étude affirment que, s'il leur est relativement facile d'identifier les marchés, il n'en est pas de même en ce qui concerne leur exploitation, en raison des coûts que cela comporte. Elles doivent donc pouvoir compter sur des programmes d'aide financière pour pénétrer et exploiter ces marchés.

La disponibilité du personnel technique est un autre problème sérieux. A l'heure actuelle, seule l'université McMaster offre un programme de génie en néo-céramique. Il devrait exister d'autres mécanismes permettant d'accroître le nombre de travailleurs compétents à l'intention de l'industrie et des organismes œuvrant dans la R et D.

L'université Queen's vient de créer une section spécialisée dans l'étude des matériaux de pointe et de promouvoir la R et D à frais partagés en milieu industriel en collaboration avec l'industrie et le gouvernement. Il y a lieu d'appuyer la mise en œuvre d'autres initiatives de ce genre.

De son côté, le gouvernement de l'Ontario a annoncé, au début de 1985, la création d'un Centre d'étude des matériaux nouveaux (dont la néo-céramique), sous l'égide de la Fondation de recherches de l'Ontario au coût de 10 millions de dollars CAN répartis sur trois ans. Cette initiative s'inscrit dans le cadre du Programme entreprises de l'Ontario et a été très bien accueillie par les industries de cette province.

Options

Le Canada a trois options pour ce qui est d'appuyer les activités liées à la néo-céramique du secteur manufacturier et des organismes de R et D des secteurs public et privé et ce, à l'échelle nationale. Il peut

- répondre aux besoins propres au secteur de la néo-céramique à l'aide des programmes d'aide existants;

- élargir les programmes existants en y ajoutant des dispositions spéciales;

- reconnaître l'importance du secteur de la néo-céramique pour le bien-être socio-économique du Canda et lancer des programmes semblables à ceux en place aux États-Unis, au Japon, en République fédérale d'Allemagne, en Suède et au Royaume-Uni.

Cette troisième option serait préférable. Elle viserait surtout à réduire progressivement l'incidence des progrès technologiques issus des États-Unis et du Japon sur l'économie canadienne et à appuyer l'industrie canadienne, surtout les nouvelles petites entreprises et les entreprises en développement. Les politiques et les programmes mis en œuvre par le MCII du Japon, notamment pour ce qui est de servir de catalyseur de la promotion de l'engagement à l'égard de l'industrie, sont considérés comme les meilleurs à l'échelle internationale. Ils pourraient servir de modèle permettant au Canada de se doter des politiques et des programmes les plus appropriés. Le gouvernement canadien pourrait donc faire preuve de leadership et assurer la coordination des activités suivantes :

- élaborer et mettre sur pied un programme national comportant des objectifs précis sur le plan technologique afin de répondre aux besoins de l'industrie et des entreprises;

- appuyer et coordonner les activités des laboratoires fédéraux pour ce qui est de la mise en œuvre de ce programmme national;

- inciter les universités et les organismes de recherche provinciaux à appuyer les objectifs fixés pour venir en aide à l'industrie.

Enfin, un conseil mixte regroupant des représentants de l'industrie, des gouvernements et des universités pourrait être mis sur pied à titre de comité consultatif chargé d'identifier et de proposer des objectifs pour le programme national.

1. INTRODUCTION

La mise au point et l'utilisation des matériaux de pointe en général, et des néo-céramiques en particulier, passent présentement par une révolution tranquille et silencieuse. Dans le développement des néo-céramiques, cette révolution a commencé il y a un peu plus d'une décennie pour satisfaire aux demandes d'une industrie à la recherche de matériaux ayant des propriétés mécaniques, électriques, chimiques et thermiques supérieures, capables de s'adapter aux progrès technologiques dans les produits de fabrication, la concurrence et le rendement, le coût et la fiabilité des services. Les réalisations les plus importantes et les mieux réussies jusqu'ici, et de beaucoup, se sont produites dans la mise en valeur et la commercialisation des matériaux de céramique utilisés en électronique. Le Japon a joui de la suprématie dans ce marché et il fournit près de 70 % de la demande mondiale.

Jusqu'à ce jour, les progrès scientifiques et technologiques ont démontré non seulement la faisabilité technique mais encore les avantages économiques, sociaux et environnementaux potentiels que pourrait générer l'utilisation d'autres types de néo-céramiques pour un certain nombre d'applications différentes comme les éléments de moteurs d'automobiles, les outils coupants, les pièces résistant à l'usure et à la corrosion, les échangeurs de chaleur. Par exemple, l'utilisation d'éléments en céramique assure trois avantages importants soit l'augmentation de l'efficacité énergétique et les économies d'énergie qui en résultent, la réduction des émissions toxiques, ce qui ne peut qu'améliorer l'environnement, et des coûts plus faibles à cause de l'utilisation de matériaux bruts dont la nature est prodigue. Les outils coupants améliorent la productivité parce qu'on peut les utiliser à des vitesses de coupe bien supérieures à celles des outils conventionnels. On estime que l'usure et la corrosion des matériaux métalliques présentement utilisés coûtent environ dix milliards de dollars par année, somme qu'on pourra économiser par l'utilisation des néo-céramiques.

Il y a une concurrence intense au niveau mondial dans la mise au point et la commercialisation d'éléments en néo-céramique pour diverses applications. Les pays qui ont adopté des stratégies nationales et consacré beaucoup de ressources et de dépenses d'investissement sont les États-Unis, la République fédérale d'Allemagne, la Suède et le Japon. La France, l'Italie et l'Angleterre déploient aussi de grandes activités dans ce domaine; on s'attend à ce que ce dernier pays s'engage dans cette direction, à l'échelle nationale, dans un avenir rapproché. On peut attribuer ces engagements à deux forces : la nécessité d'industries de haute technologie pour les nouveaux matériaux sans lesquels de nombreux progrès technologiques seront impossibles; et l'énorme potentiel économique du marché mondial qui devrait atteindre 20 milliards de dollars, estime-t-on, d'ici l'an 2000.

Jusqu'à maintenant, les réussites industrielles sont très prometteuses et encourageantes. On a fait des progrès sensibles dans la mise au point des matériaux destinés à des applications techniques et autres applications connexes. Il règne aujourd'hui de l'optimisme dans la recherche de solutions satisfaisantes et opportunes aux derniers obstacles technologiques, à savoir : la possibilité de reproduction des objets fabriqués, la fiabilité du service et des coûts compétitifs.

On s'attend à ce que les néo-céramiques aient, à long et à moyen terme, un impact sensible sur les fournisseurs de matériaux industriels canadiens traditionnels. Certains secteurs de l'industrie canadienne pourraient prendre une vie nouvelle grâce à l'utilisation des néo-céramiques. De plus, il pourrait se créer de nouveaux marchés pour les matières premières canadiennes nécessaires à la fabrication des néo-céramiques.

L'objectif de la présente étude est d'identifier, d'étudier et d'évaluer les dangers et les ouvertures qui se présentent à l'industrie canadienne dans le secteur des néo-céramiques.

2. MÉTHODOLOGIE

Les résultats présentés dans cette étude sont fondés sur une analyse minutieuse et une évaluation des renseignements obtenus des sources énumérées ci-après :

- ° Documents techniques publiés, rapports privés d'évaluation du marché et publications gouvernementales énumérés dans la bibliographie.

- ° Renseignements basés sur des discussions en profondeur au cours de visites dans diverses industries, aux laboratoires universitaires et aux laboratoires de recherches gouvernementaux aux États-Unis, en République fédérale d'Allemagne, en Suède, en Angleterre et au Japon. On a obtenu des données spécifiques sur l'état présent et les tendances de la technologie des céramiques, les perspectives du marché, la concurrence globale et les aspects économiques généraux des produits (Annexe A).

- ° Discussions personnelles avec certains spécialistes choisis au Canada (Annexe B).

3. DESCRIPTION DES NÉO-CÉRAMIQUES

3.1 Définition

Le mot " céramique " est un terme qui englobe une grande variété de matériaux inorganiques. La définition utilisée aujourd'hui est plus large que la définition historique : l'art et la science de faire et d'utiliser des articles solides fabriqués par l'action de la chaleur sur des matières premières terreuses; c'est une extension du mot grec " keramos " et la définition est beaucoup plus large que celle qu'on trouve ordinairement dans les dictionnaires où céramique est synonyme de poterie ou de faïence. La définition courante généralement acceptée est celle qui a été adoptée initialement par la U.S. Academy of Sciences, à savoir : " un matériau inorganique, non métallique, traité et consolidé à des températures élevées ". En Europe et dans de nombreux autres pays, on fait une distinction entre la " céramique " et le "verre ", au moins du point de vue de l'industrie. En Amérique du Nord et au Japon toutefois, le mot "céramique" englobe le verre.

Dans le contexte de l'utilisation présente et future des produits céramiques, on peut diviser ceux-ci en deux groupes à savoir les " céramiques traditionnelles " et les " néo-céramiques ". Un certain nombre de matériaux utilisés par le public en général (marché de la consommation) et par l'industrie primaire depuis des temps immémoriaux font partie de la famille des céramiques traditionnelles et sont présentés à la figure 1. On peut citer parmi ces matériaux : la poterie, la brique, la vaisselle, les appareils sanitaires, les isolants (thermiques et électriques), le verre et les matières réfractaires.

Le terme de " néo-céramique "* concerne un groupe considérable et varié de matériaux inorganiques comprenant des oxydes, des carbures, des nitrures, du graphite et une combinaison de ces diverses matières. Les caractéristiques qui les distinguent sont, en général : un niveau de rendement sensiblement plus élevé, des exigences beaucoup plus rigoureuses sur le contrôle de leur composition et de leur traitement et une valeur commerciale basée sur le rendement remarquable qu'ils obtiennent, ce qui justifie un coût beaucoup plus élevé.

On a adopté cette voie dans la formulation et la mise au point des matériaux de néo-céramique. On a tout d'abord amélioré les propriétés des céramiques conventionnelles en utilisant de nouveaux concepts dans la

---

* En Amérique du Nord et en Europe, le terme de " néo-céramique " désigne des produits céramiques de rendement élevé qui ont des propriétés électriques, mécaniques, chimiques ou thermiques supérieures. Toutefois, au Japon, on utilise le terme de " céramiques fines " parce que ces matériaux sont faits de particules très fines et que leur microstructure consiste en cristaux de grains fins.

science et la fabrication des céramiques. Deuxièmement, on a mis au point de nouvelles compositions de matériaux qui possèdent naturellement des propriétés supérieures. Ces matériaux peuvent être traités par les méthodes traditionnelles ou par des techniques plus évoluées; dans un cas comme dans l'autre, ils donnent des céramiques ayant des propriétés supérieures. Troisièmement, on recourt à une technologie composite pour obtenir les propriétés désirées : des techniques de " céramique-en-céramique ", " céramique-en-métal " et de " métal-en-céramique ".

Les néo-céramiques sont généralement utilisées comme éléments dans l'outillage, les dispositifs ou la machinerie de traitement parce qu'elles peuvent exécuter certaines fonctions mieux que les métaux ou les polymères qui leur font concurrence.

Dans la mise au point et l'utilisation des néo-céramiques, il est nécessaire de tenir compte des propriétés fonctionnelles requises pour répondre aux besoins de l'utilisation finale. La figure 2 présente la grande diversité de propriétés fonctionnelles que peuvent avoir ces matériaux. La liste suivante énumère les propriétés remarquables des néo-céramiques qui les rendent spécialement utiles pour l'obtention d'un haut rendement :

- Degré de dureté élevé
- Résistance mécanique à haute température
- Résistance élevée à la corrosion et à l'érosion
- Coefficient élevé de couplage piézo-électrique
- Perméabilité magnétique élevée
- Point de fusion élevé
- Faible densité
- Transparence optique
- Conduction ionique rapide
- Faible conductivité thermique

Cependant, dans le but de tirer un meilleur profit de ces propriétés supérieures, il reste encore à faire beaucoup de recherches et de mises au point afin de venir à bout des restrictions imposées par les propriétés négatives de ces produits, principalement leur extrême fragilité. Leur manque de plasticité constitue le facteur le plus important venant compliquer leur conception, leur fabrication et leur utilisation. La fragilité de ces produits a deux effets principaux : on ne peut les déformer après leur mise en forme comme dans le cas des métaux (par exemple, par le forgeage); et, deuxièmement, la rupture des produits céramiques est ordinairement soudaine et catastrophique.

3.2 Classification et champ d'utilisation

La figure 3 ci-après présente un système de classification adopté par le Bureau des céramiques fines du ministère de l'Industrie et du Commerce international du Japon, à Tokyo. Les figures 4 à 8, pour leur part,

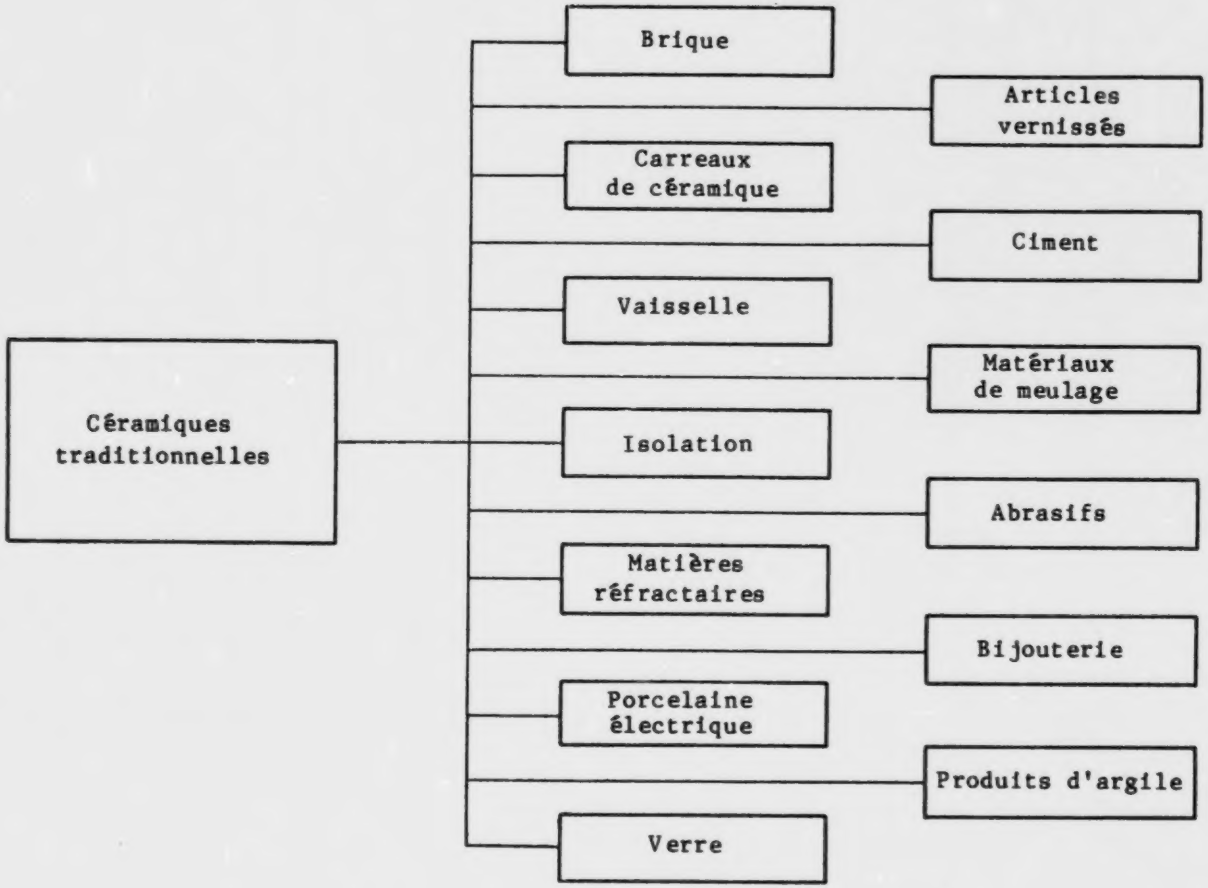
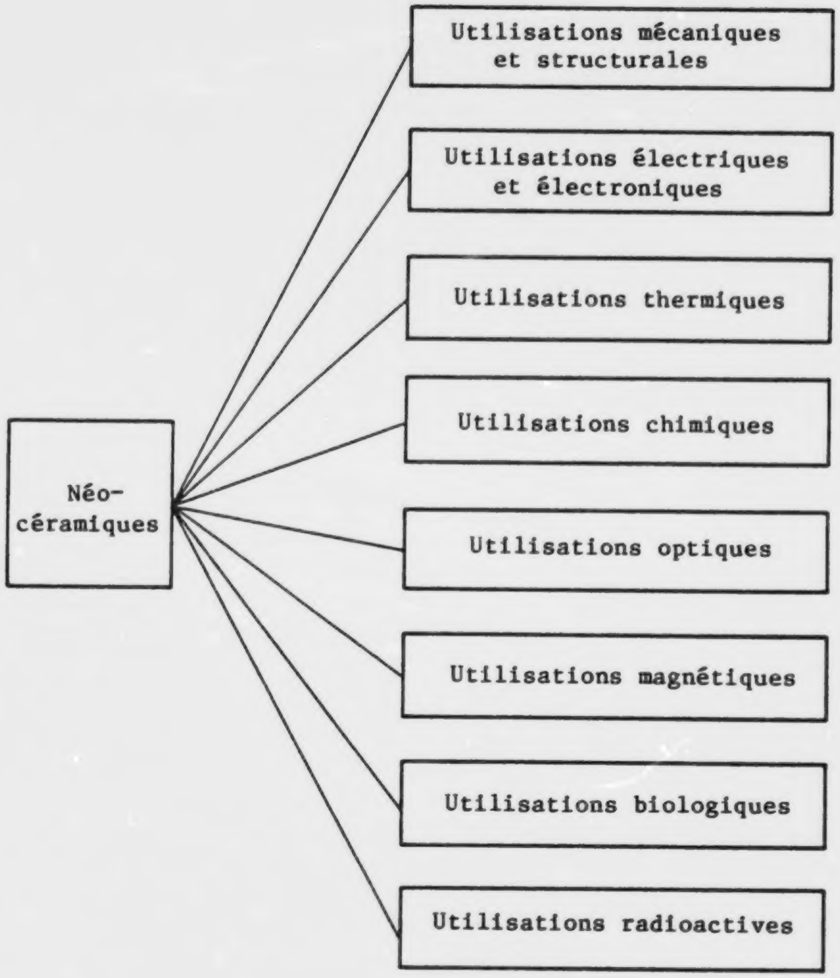


FIGURE 1 : Champs d'utilisation des céramiques traditionnelles.



<u>FIGURE 2</u> : Champs d'utilisation des néo-céramiques.
Source: Kenney et Bowen.

présentent des corrélations plus détaillées entre les fonctions, les propriétés et les applications. Il est évident, d'après ces figures, que les néo-céramiques ont une multitude d'utilisations qui atteignent de nombreux secteurs industriels : transports, électronique, communications, fabrication et énergie. A cause de la grande diversité de ces applications, on peut prévoir que même une pénétration mineure des néo-céramiques sur le marché aura une influence considérable sur la majorité des industries.

Une caractérisation plus large, très répandue présentement, classifie toutes les applications en deux groupes, les céramiques structurales et les céramiques fonctionnelles.

La catégorie " structurale " comporte principalement les fonctions mécaniques mais elle comprend aussi les aspects chimiques et thermiques (par exemple, la résistance à la corrosion et au choc thermique) quand ces aspects sont nécessaires à l'exécution de la fonction mécanique. La catégorie " fonctionnelle " englobe les utilisations électriques, magnétiques, optiques, biologiques et nucléaires ainsi que certaines utilisations chimiques lorsque celles-ci nécessitent les propriétés des céramiques " fonctionnelles ".

3.3 Matériaux et technologie

3.3.1 Généralités

Comme on doit s'y attendre, la composition chimique et la structure cristalline des matériaux de néo-céramique varient considérablement. Pour toute application donnée, par conséquent, il est nécessaire de déterminer la ou les compositions spécifiques qui présenteront les propriétés fonctionnelles requises. Toutefois, les propriétés définitives de la céramique dépendent de sa microstructure laquelle, à son tour, dépend des conditions et des paramètres de la fabrication. C'est pourquoi nous présenterons ici une brève discussion des corrélations entre la microstructure et les procédés de fabrication. Étant donné, d'autre part, que les propriétés des " céramiques structurales " sont entièrement différentes de celles du groupe des " céramiques fonctionnelles ", nous les examinerons séparément.

3.3.2 Procédés de fabrication de la céramique

La figure 9 présente une vue simplifiée des procédés de fabrication de la céramique. En règle générale, on mélange les matières premières de la céramique sous forme de poudres avec les additifs requis, soit des liants, des défloculants ou des agglomérants. Le mélange peut se faire à sec ou en pâte, auquel cas, on le fait sécher par pulvérisation. On utilise normalement quatre techniques pour façonner la céramique : le coulage à l'aide de barbotine et d'un moule approprié, le pressage uniaxial, le matriçage isostatique et le moulage par injection. On

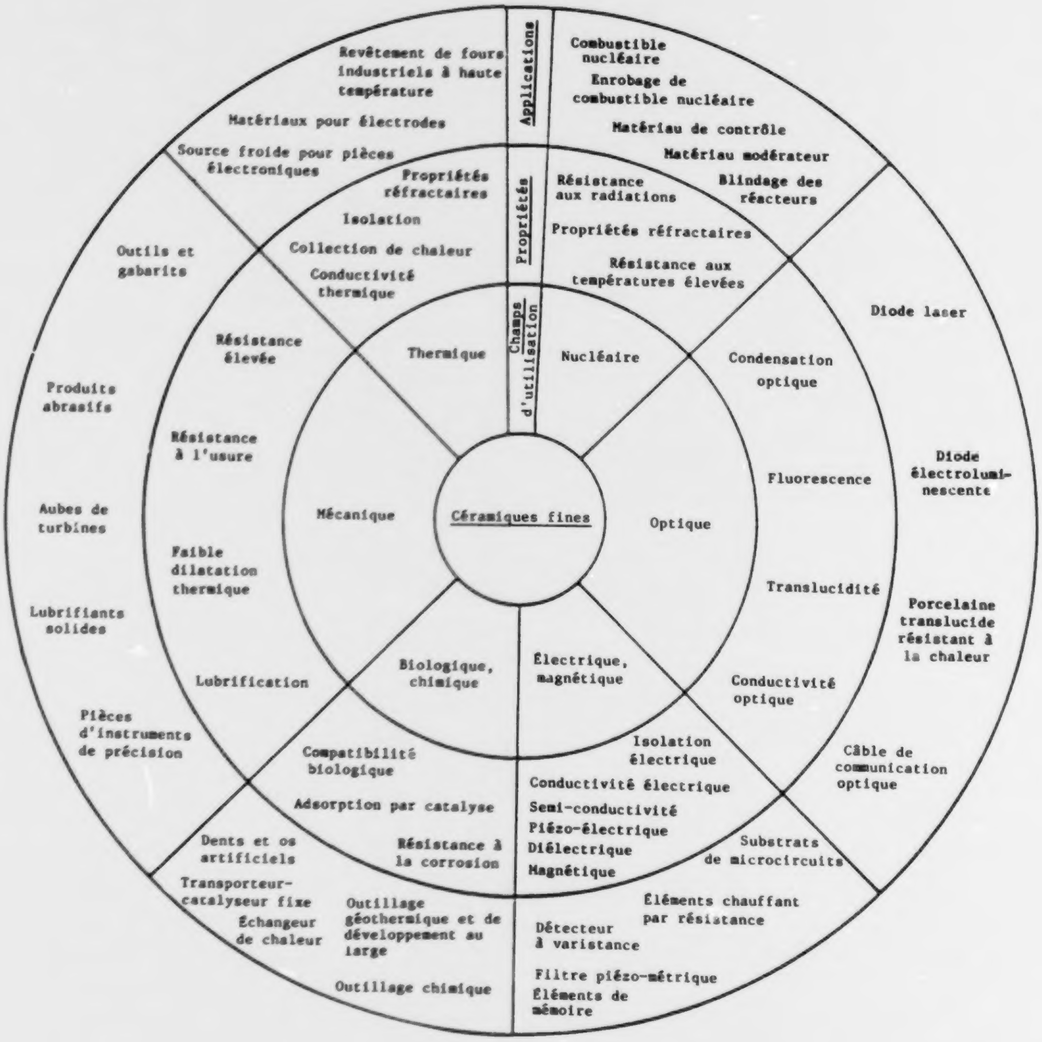


FIGURE 3 : Applications fonctionnelles des néo-céramiques.
Source : Bureau des céramiques fines, ministère de l'Industrie et du Commerce international, Tokyo.

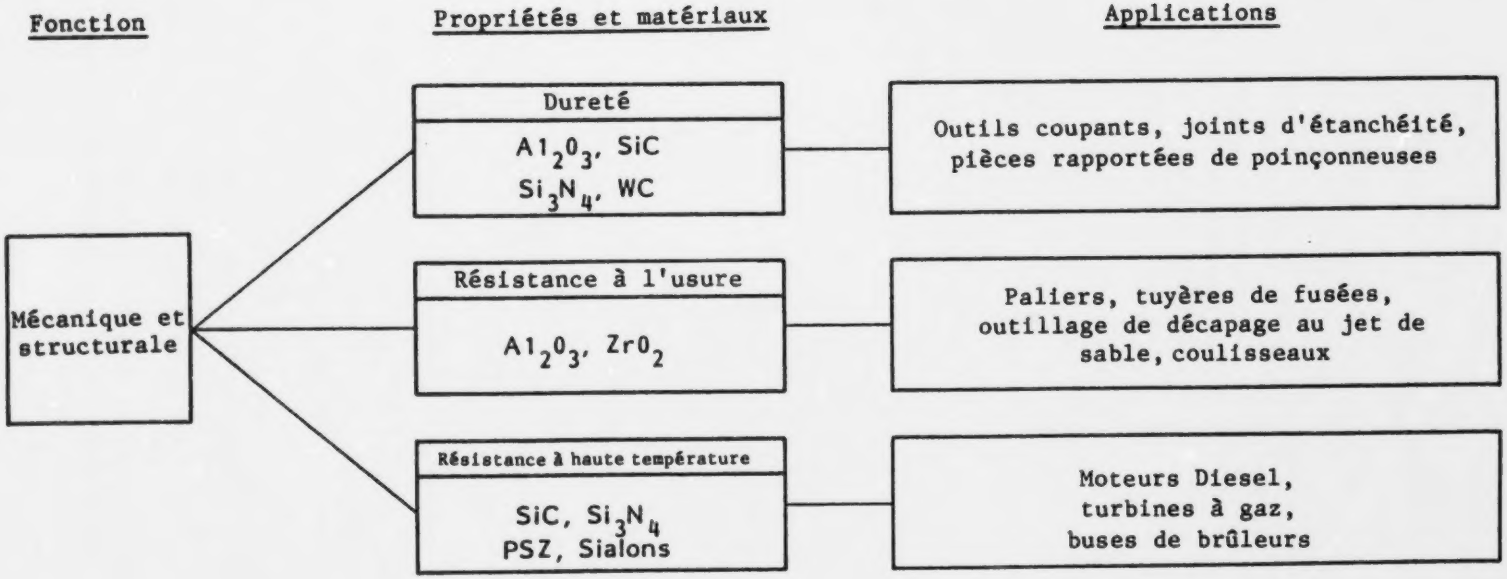


FIGURE 4 : Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications mécaniques et structurales.
Source: Kenney et Bowen.

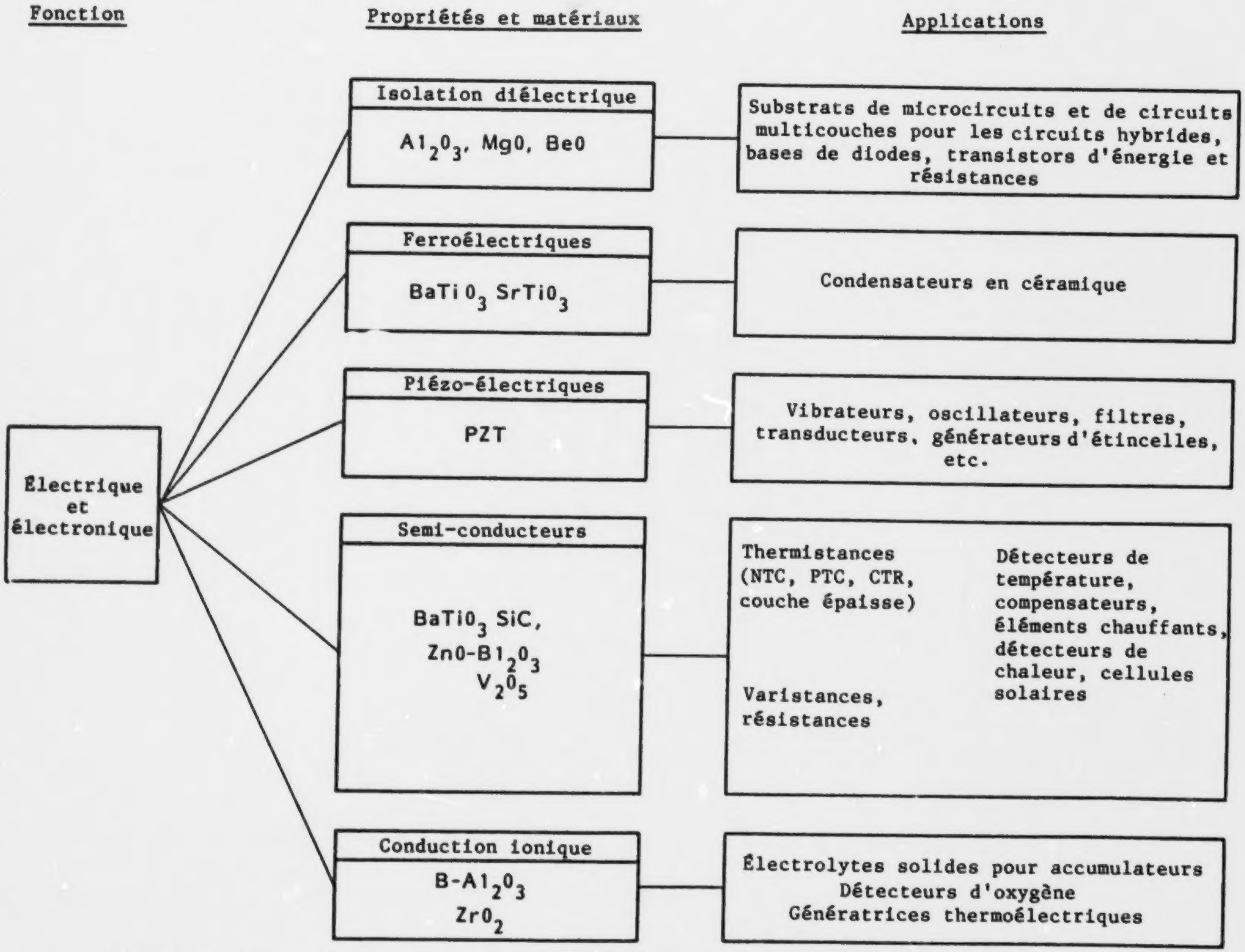


FIGURE 5 : Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications électriques et électroniques.
Source: Kenney et Bowen.

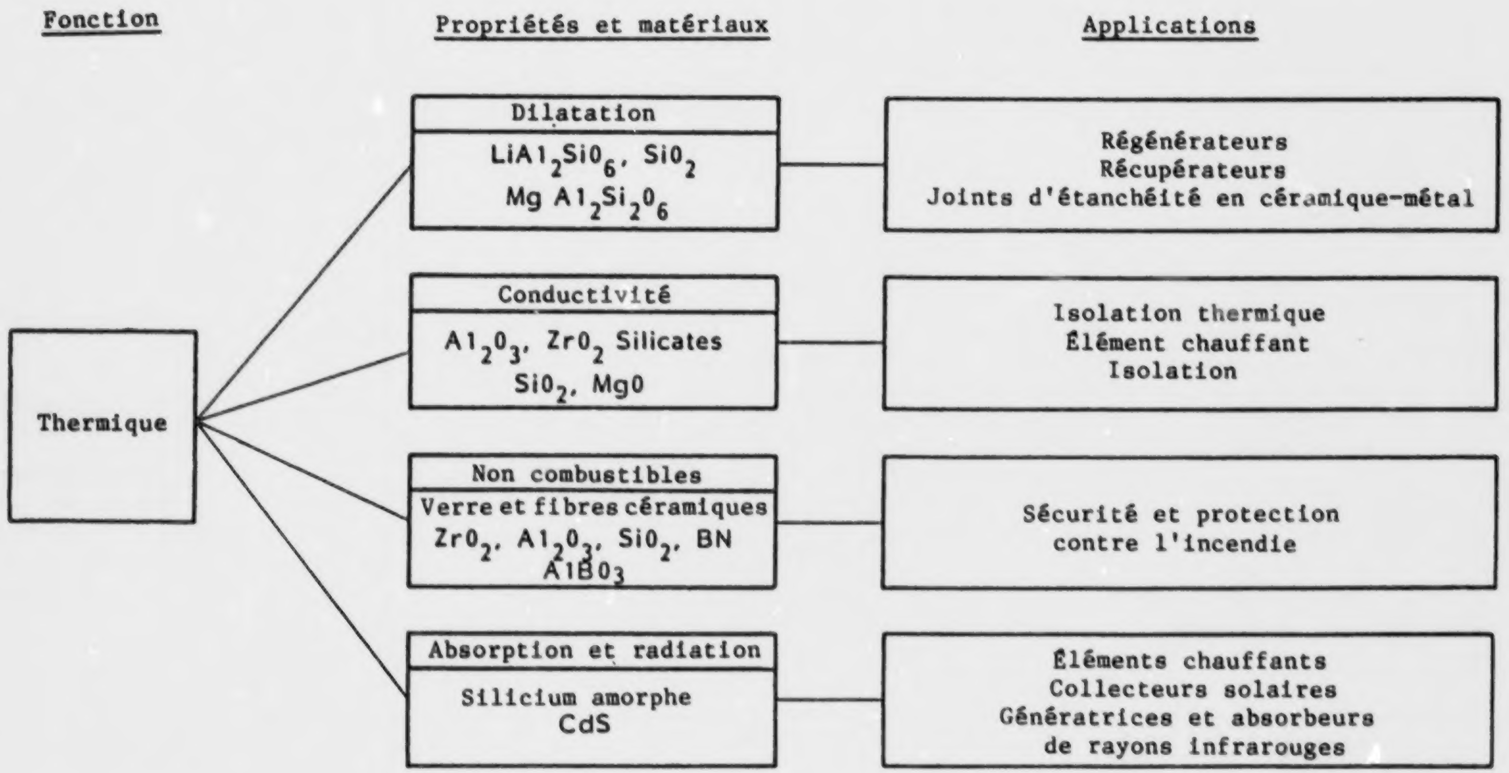


FIGURE 6 : Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications thermiques.
Source: Kenney et Bowen.

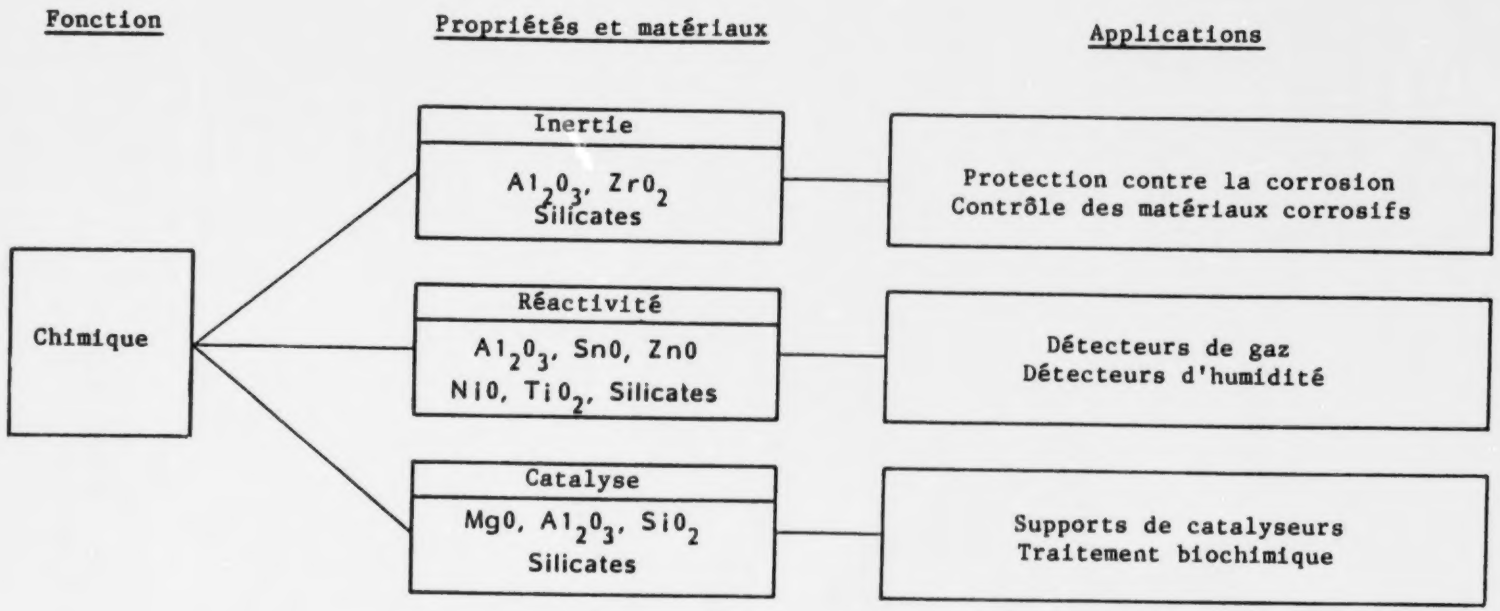


FIGURE 7 : Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications chimiques.
Source: Kenney et Bowen.

Fonction	Propriétés et matériaux	Applications
Magnétique	**Ferrite tendre** Mn Zn Fe	Têtes d'enregistrement magnétiques Noyaux de télévision, etc. Enregistreurs vidéo et audio Périphériques d'ordinateurs
	Ferrite dure Ba_6Fe	Hauts-parleurs, moteurs, Aimants permanents
Optique	**Transparence** Al_2O_3, MgO, Y_2O_3, ThO_2 Fluorures	Lampes au sodium, fenêtres à infrarouge Fenêtres électromagnétiques Matériaux pour laser
	Mémoire Céramiques PLZT	Affichage et entreposage vidéo Éléments de mémoire Modulation de la lumière Opto-électronique des obturateurs
Biologique	**Inertie** Al_2O_3	Implants chirurgicaux Os artificiels
	Compatibilité $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$	Applications dentaires

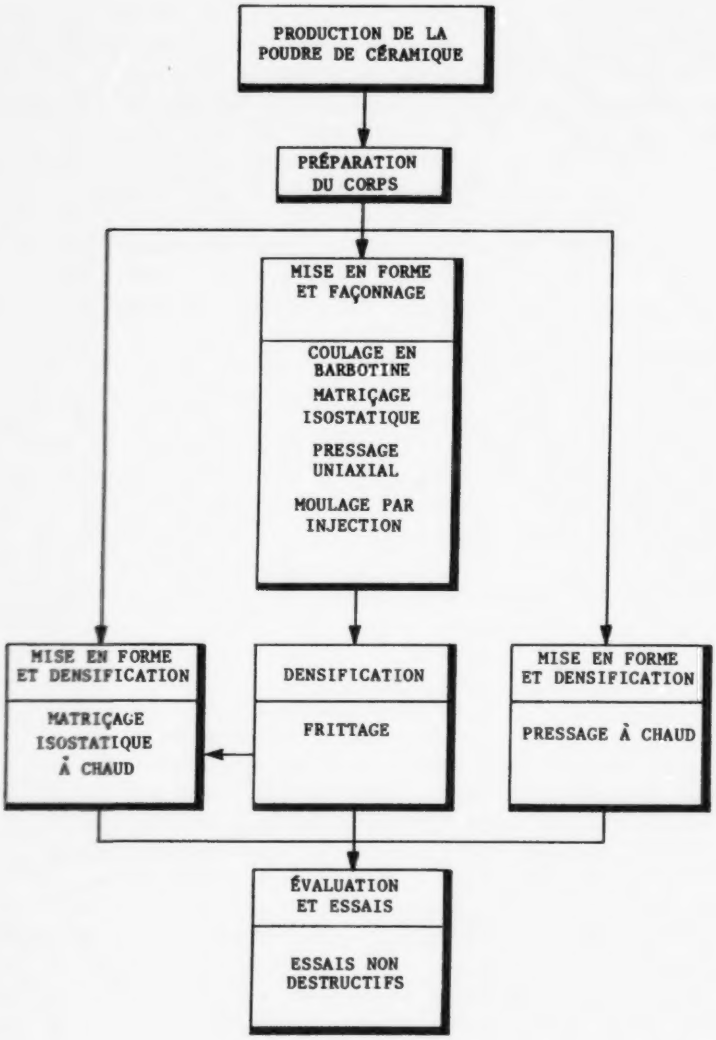
FIGURE 8 : Champs d'utilisation des néo-céramiques pour les applications magnétiques, optiques et biologiques.
Source: Kenney et Bowen.

utilise communément ces procédés dans la fabrication des céramiques traditionnelles et, avec quelques modifications, on y recourt aussi pour la fabrication des néo-céramiques. Le coulage en barbotine et le moulage par injection sont particulièrement intéressants : le premier, pour la fabrication de formes creuses complexes et le second, pour la production en série de formes simples aussi bien que complexes. Après leur mise en forme, les articles sont séchés pour obtenir des produits " verts "; dans le cas du moulage par injection, il faut détruire les matières organiques en les brûlant à basse température, généralement au-dessous de 500 °C. La densification des produits " verts " se fait par le " frittage ", c'est-à-dire en traitant les produits à des températures plus élevées pour réaliser la consolidation des particules par agglomération chimique. Les conditions du traitement thermique comme les températures de frittage, les taux de chauffage et de refroidissement et la durée du frittage dépendent de la composition des matériaux autant que de la microstructure requise.

Les techniques de pressage à chaud (HP) ou de matriçage isostatique à chaud (HIP) sont des procédés relativement nouveaux. Ce sont des procédés coûteux et on ne peut donc y recourir que lorsque les conditions en justifient les coûts supplémentaires et qu'on peut recouvrer ces coûts par un prix de vente plus élevé du produit. Dans ces deux techniques, le façonnage de la céramique et le frittage se font en une seule et même opération.

En contrôlant les relations entre le temps et la température, on peut obtenir la microstructure désirée. Les deux procédés donnent des produits de densité très élevée, une caractéristique requise de presque tous les produits de néo-céramique. Ces deux procédés sont d'usage commercial courant. On ne peut utiliser les techniques HP que pour des formes simples, alors que le procédé HIP peut servir à la fabrication de formes simples aussi bien que complexes, comme les rotors des turbocompresseurs. Il est possible de combiner les techniques HIP à la technologie ordinaire du frittage pour produire des éléments exempts de tout défaut et ayant des propriétés supérieures comme, par exemple, les têtes d'enregistrement faites de ferrites, les céramiques piézo-électriques pour les transducteurs, les outils coupants et les aubes de turbines. Les États-Unis d'Amérique (General Electric Co., GTE, Gorham, Garrett, Batelle), la Suède (AESA Ceram) et le Japon (Kobe Steel, Mitsubishi) se sont consacrés activement à la mise au point des techniques de frittage HIP destinées à la production des néo-céramiques.

La technologie de frittage HIP que la compagnie Kobe Steel est en train de mettre au point au Japon promet de réduire considérablement les coûts de fabrication. Grâce à une technique nouvelle, il est possible de transférer les produits du four de frittage au four HIP sans refroidissement; on prévoit que ce nouveau procédé coupera le temps de traitement thermique de plus de 50 %.



<u>FIGURE 9</u> : Procédés de fabrication de la céramique.

Le procédé HIP ASEA Ceram, mis au point en Suède, est lui aussi unique et on prétend qu'il possède des caractéristiques lui permettant de faire une production en série à coût raisonnable. Aux États-Unis, la compagnie Norton a acquis cette technologie montrée succinctement à la figure 10.

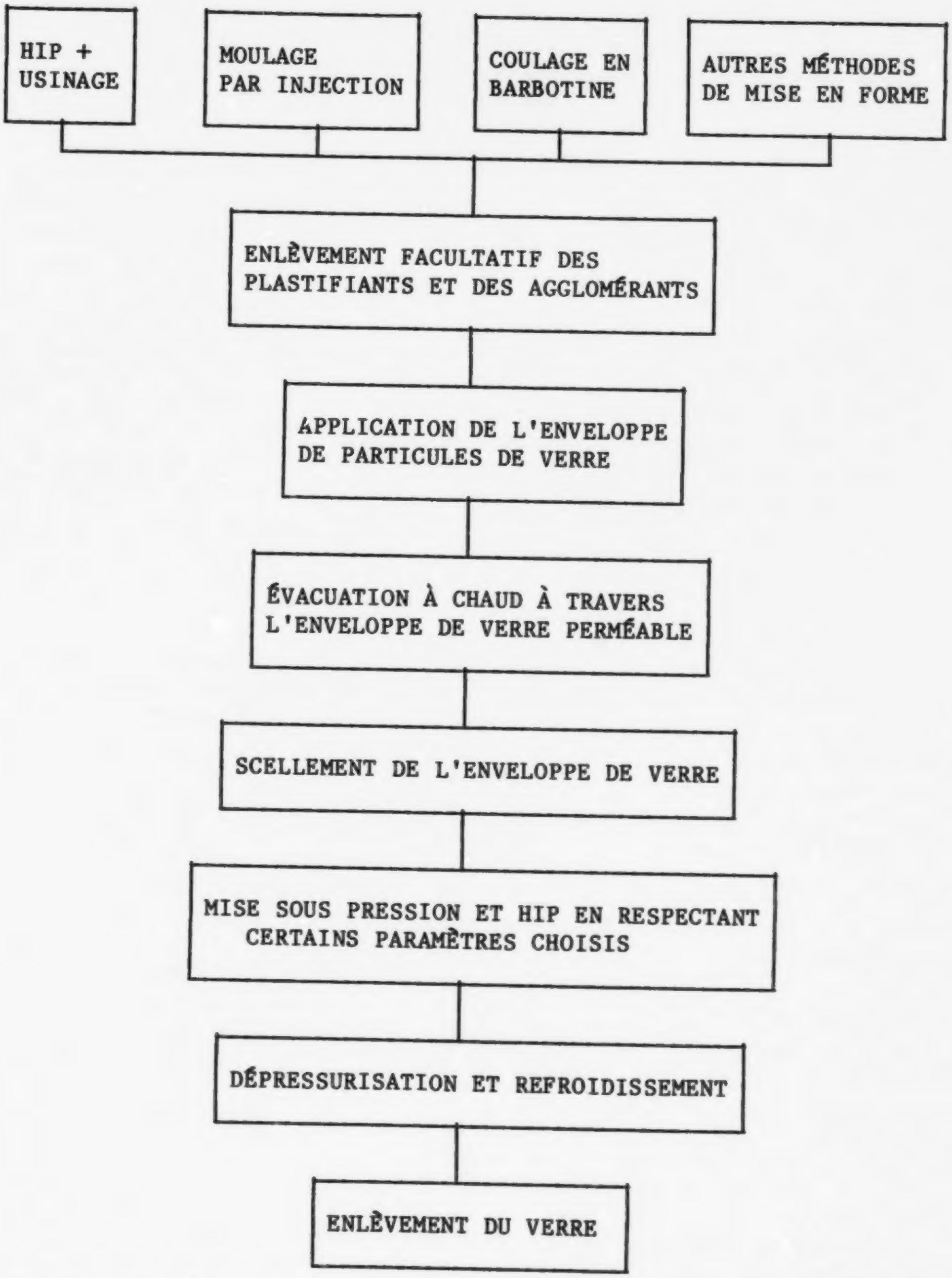


FIGURE 10 : Procédé de matriçage isostatique à chaud (HIP) - ASEA Ceram

On reconnaît universellement aujourd'hui qu'on ne peut accéder à la fabrication en série tout en assurant la fiabilité des propriétés des néo-céramiques que par une meilleure connaissance des méthodes de fabrication de la céramique et par l'amélioration de ces méthodes. On a décelé la présence de deux types d'obstacles technologiques qu'il faudra franchir. Ce sont :

° les obstacles que constituent les matériaux de départ;
° les obstacles que constituent les procédés.

Obstacles que constituent les matériaux de départ

Fondamentalement, tous les procédés de fabrication des céramiques dépendent des caractéristiques et des propriétés des poudres de départ. Les principaux obstacles technologiques, ou les possibilités de changements technologiques, au niveau des poudres céramiques sont les suivants : tout d'abord, il est nécessaire de mieux préciser les propriétés physiques, chimiques et superficielles des poudres. Il faut obtenir une meilleure caractérisation de la chimie de masse et de surface, de la distribution granulométrique des poudres, de la forme des particules, de leur surface et de la structure de l'agglomérat. Deuxièmement, on n'a pas encore bien établi les corrélations entre les caractéristiques des poudres, les paramètres des procédés et les produits finis, et on devra s'attaquer à ces questions. Troisièmement, on prévoit que de nouvelles poudres améliorées aideront à assurer le succès des étapes successives de la fabrication. Les poudres céramiques ont tendance à contenir des agglomérats ou des amas de particules qui adhèrent les unes aux autres. Quand on ne peut pas corriger cette situation, les agglomérats peuvent laisser des pailles dans la céramique et la dimension de l'agglomérat est en rapport direct avec la taille du défaut microstructural dans le produit fini. Une école de pensée parmi les spécialistes en céramique a adopté le point de vue que la clef de la solution des problèmes de coût et de fiabilité des néo-céramiques réside dans la production de poudres de forme sphérique, ultra-fines, indépendantes les unes des autres, exemptes d'agglomérats. Parmi les techniques de traitement des poudres qu'envisagent les adeptes de ces poudres sphériques monodispersives, on peut mentionner la technologie sol-gel, la technologie des polymères et les réactions en phase gazeuse.

D'autres scientifiques des matériaux, tout en étant d'accord pour dire que les agglomérats nuisent aux propriétés des produits finis, croient cependant qu'on ne dispose pas d'assez de preuves à l'appui des avantages à retirer de l'utilisation de poudres sphériques monodispersives. On signale, en fait, que l'utilisation de ce type de poudres n'est peut-être pas nécessaire, encore moins suffisante, pour obtenir des produits finis ayant les propriétés désirées. Il y a des raisons de croire que, même si on utilise une poudre idéale, il peut se présenter de nombreux autres problèmes au cours des étapes subséquentes, problèmes qui sont eux aussi susceptibles d'introduire des pailles.

Obstacles que constituent les procédés

On a déterminé l'existence de problèmes et de possibilités d'amélioration à toutes les étapes des opérations de traitement des éléments. Il a été clairement établi qu'il est nécessaire de mieux comprendre l'étape du façonnage ou de la consolidation, particulièrement en vue de la production d'un " corps vert " exempt de défauts. On a attribué l'origine de nombreuses pailles dans la microstructure finale, densifiée, aux imperfections contenues dans le " corps vert ". A ce point de vue, les techniques de coulage en barbotine et de moulage par injection semblent donc être préférables. Le coulage en barbotine commence par la dispersion colloïdale de la poudre dans des fluides, et le moulage par injection produit du cisaillement dans le mélange de poudre et de liant ce qui détruit les agglomérats.

Il y a aussi d'autres problèmes rattachés au défi technologique que constitue l'élimination des défauts des " corps verts " et auxquels on s'attaque présentement, à savoir :

° L'obtention d'un tassage uniforme des poudres sans qu'il s'y trouve de variations de densité (ou de porosité) dues à des méthodes de façonnage qui ne favorisent pas l'agglomération.

° Les effets et les mécanismes de l'enlèvement des liants comportent des risques pour la densité des produits. Il faut généralement de 4 à 5 jours pour le cycle complet de combustion. L'enlèvement des fluides dans le procédé de coulage en barbotine prend aussi une période de temps assez longue. Des études sont en cours pour réduire cette période de temps.

On a aussi découvert un certain nombre de problèmes rattachés au cycle du frittage, c'est-à-dire de la densification, problèmes que l'on tente actuellement de résoudre.

3.3.3 Néo-céramiques structurales

Les matériaux de néo-céramique structurale suivants conviennent particulièrement à des applications techniques :

° Nitrure de silicium, Si_3N_4
° Sialon, $Si_{6-x}Al_xN_{8-x}O_x$
° Carbure de silicium, SiC
° Zircone (PSZ), ZrO_2

On a entrepris la mise au point de ces matériaux depuis plus de quinze ans et, pour un certain nombre d'applications, les compositions de première génération ont atteint l'étape de la production commerciale. Le tableau 1 fait la comparaison entre leurs diverses propriétés. En ce qui a trait aux utilisations dans les moteurs cependant, les compositions de matériaux présentement disponibles de même que les technologies de traitement ne sont pas entièrement satisfaisantes. Les restrictions importantes concernent le manque de reproductibilité dans la fabrication et de fiabilité dans les caractéristiques. On poursuit donc présentement des efforts intenses de recherche et de développement aussi bien pour porter la composition à son plus haut niveau possible que pour améliorer les procédés de traitement. Nous décrirons brièvement ci-après l'état des travaux en cours portant sur ces matériaux.

3.3.3.1 Nitrure de silicium (Si_3N_4)

Généralités

Le nitrure de silicium fut découvert en 1910, mais ce n'est que dans les années soixante qu'on commença à manifester un intérêt commercial pour ce matériau à cause des développements technologiques réalisés en Angleterre et qui ont mené à des compositions de grande résistance. La possibilité d'une vaste gamme d'applications devint alors évidente et la mise au point de la technologie s'est accélérée au cours des années soixante-dix avec le lancement de plusieurs projets aux États-Unis, en République fédérale d'Allemagne et au Japon.

Production de la poudre

Les propriétés techniques des éléments céramiques de nitrure de silicium dépendent fortement de la nature, de la structure et des propriétés de la poudre de départ. Un frittage efficace, en particulier, imposera des exigences rigoureuses quant à la pureté et aux caractéristiques de la poudre de départ. La superficie spécifique et la teneur en oxygène des poudres sont particulièrement importantes pour obtenir de bonnes propriétés dans le produit fini. La figure 11 ci-après établit une comparaison entre la surface spécifique et la teneur en oxygène des matériaux disponibles dans le commerce.

Parmi les caractéristiques importantes nécessaires, il faut mentionner :

- ° une surface spécifique élevée (25 m^2/g)
- ° une phase-alpha élevée et une phase-bêta contrôlée
- ° une faible contamination par les métaux et le carbone
- ° une teneur contrôlée en oxygène et en substances non métalliques.

TABLEAU 1

Propriétés des néo-céramiques structurales

Matériau	Résistance MPa	Dureté MPamexp (½)	Dilatation thermique 10 exp (-6)/C
	Types de nitrure de silicium		
RBSN	300	3,6	3,3
HPSN	1100	6,6	3,5
GPSSN	440	2,9	3,5
	Types de carbure de silicium		
Alpha SSC	420	2 à 3	4,1
Beta SSC	533	2,4	4,1
HPSC	880	3,9	4,2
	Types de céramiques durcies par transformation		
PSZ	700+	8+	10,2
TTA	900	8	7
	Matériaux composites céramique-céramique		
SiC-LAS	620	15	1 à 4

Légende :

RBSN	Nitrure de silicium lié par réaction
HPSN	Nitrure de silicium matricé à chaud
GPSSN	Nitrure de silicium fritté sous pression de gaz
Alpha SSC	Carbure de silicium fritté en phase-alpha
Bêta SSC	Carbure de silicium fritté en phase-bêta
HPSC	Carbure de silicium matricé à chaud
PSZ	Bioxyde de zirconium partiellement stabilisé
TTA	Alumine durcie par transformation
SiC-LAS	Fibres de carbure de silicium dans du verre d'aluminosilicate de lithium

Un certain nombre de méthodes permettent de fabriquer des poudres de nitrure de silicium; cependant, les quatre méthodes suivantes ont une plus grande importance commerciale :

(i) Nitruration de poudre de silicium

Dans ce procédé, la poudre de silicium métallique est amenée à réagir avec de l'azote pur ou avec des mélanges de gaz comme H^2 + N_2 ou ammoniac. A des températures inférieures à 1450°C, on obtient principalement du nitrure de silicium de phase-alpha qui doit toutefois être broyé pour donner des poudres fines. La figure 11 énumère quelques-unes des compagnies qui utilisent ce procédé. On estime que la compagnie H.C. Starck, en République fédérale d'Allemagne, produit environ 50 tonnes de ce produit par année.

(ii) Réduction carbothermique de la silice

En présence du carbone et de l'azote, la silice à grains fins réagit conformément à la réaction suivante :

$$3\ SiO_2 + 6C + 2\ N_2 \longrightarrow Si_3N_4 + 6\ CO$$

La société Toshiba du Japon utilise ce procédé. On en estime le coût à environ 20 000 yens/kg (80$ US/kg). L'objectif est de réduire ce coût à 5 000 yens/kg. Comme on utilise un excédent de carbone dans la production, il reste un peu de carbone libre dans la poudre de nitrure. Le recuit à l'air permet d'oxyder partiellement ce carbone. Si on répand dans la poudre de silicium de petites quantités de poudre de nitrure de silicium préfaçonnée, on obtient une poudre de nitrure de silicium-alpha équiaxiale uniforme qui a de bonnes caractéristiques d'écoulement et tassement.

(iii) Réaction en phase vapeur

On peut aussi préparer la poudre de nitrure de silicium en faisant réagir des composés de silicium gazeux comme le tétrachlorure de silicium ou le silane avec de l'ammoniac.

$$3\ SiCl_4 + 4\ NH_3 \longrightarrow Si_3N_4 + 12\ HCl$$

Si on utilise les bonnes conditions de réaction, on peut produire directement une poudre de nitrure de silicium amorphe très fine. La contamination de la poudre par le chlore qui affecte les propriétés des éléments après le matriçage à chaud constitue un problème. GTE Sylvania aux États-Unis utilise ce procédé pour la production commerciale. Bien qu'au tout début la compagnie GTE ait distribué ces poudres commercialement, elle utilise maintenant toute sa production pour la fabrication d'outils coupants dans ses propres usines.

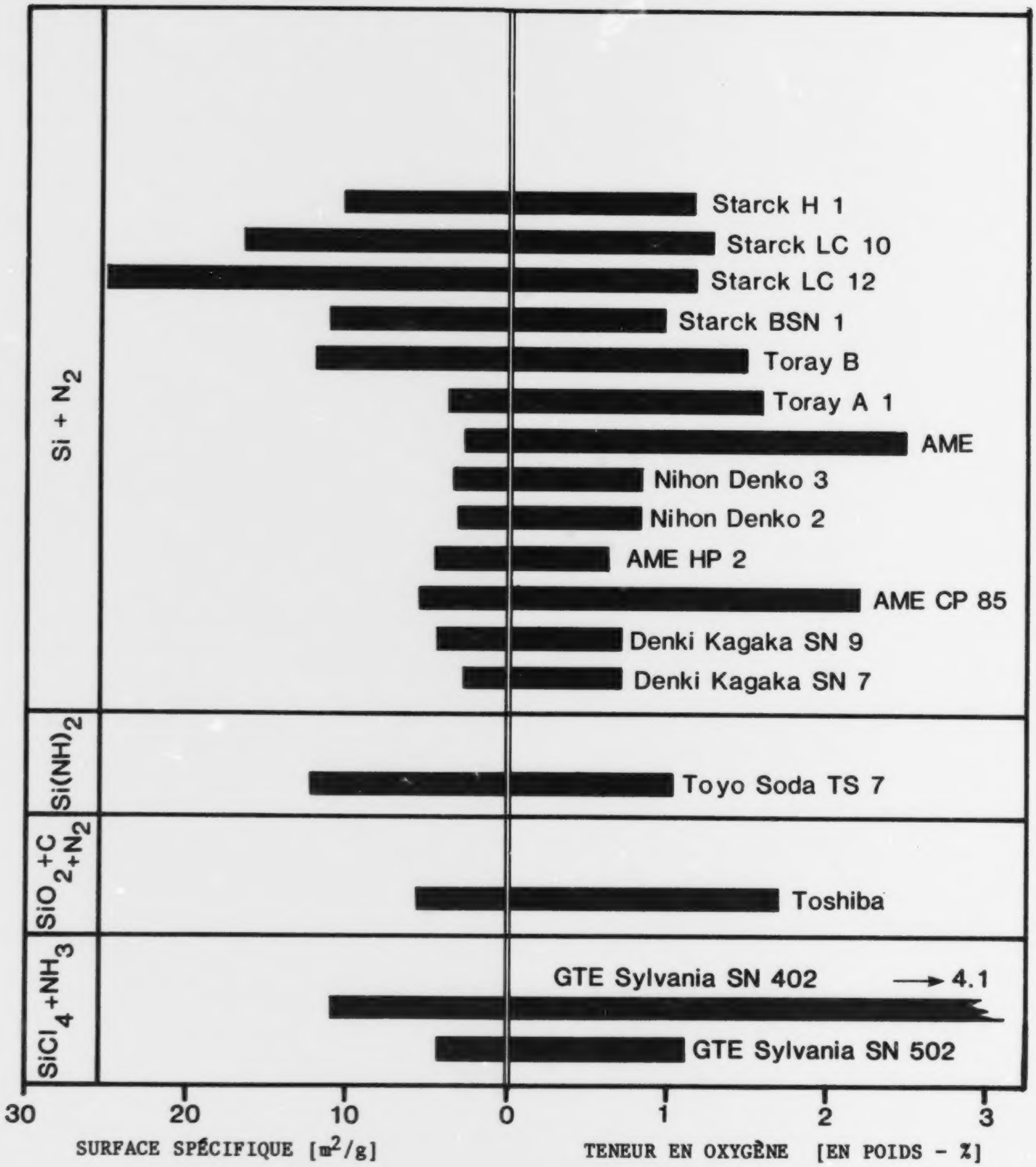


FIGURE 11 : Surface spécifique et teneur en oxygène des poudres de nitrure de silicium commerciales.
Source: Grill, Max Planck Institute, Stuttgart (République fédérale d'Allemagne).

L'utilisation de l'énergie laser pour obtenir une excitation moléculaire et une réaction amenant la formation de poudres très fines ($>$ 50 nm) de grande pureté a suscité de l'intérêt récemment pour ce procédé. Ces poudres sont normalement amorphes mais elles se cristallisent à environ 1300 °C en phase-alpha. Ce procédé est actuellement à l'étude en laboratoire à l'université Rutgers, aux États-Unis.

(iv) Décomposition de l'imide de silicium

Il est aussi possible de produire de la poudre de nitrure de silicium (variété-alpha) de haute qualité par la décomposition de l'imide de silicium.

$$Si(NH)_2 \longrightarrow Si_3N_4 + 2NH_3$$

Deux compagnies utilisent commercialement ce produit au Japon : Tokyo Soda et les industries Ube. Cette dernière compagnie construit présentement une nouvelle usine qui portera le volume de la production à 100 tonnes par an. Cette usine devrait être en exploitation en 1986.

Fabrication d'éléments céramiques en nitrure de silicium

Les procédés techniques utilisés pour la fabrication d'éléments de nitrure de silicium dépendent des propriétés finales recherchées et de l'utilisation spécifique des éléments. Les matériaux produits par différents procédés sont, par ordre chronologique :

° Nitrure de silicium lié par réaction	RBSN
° Nitrure de silicium fritté sous pression, pressé à chaud et matricé à chaud isostatiquement	PSSN, HPSN, HIPSN
° Nitrure de silicium fritté	SSN
° Nitrure de silicium lié par réaction après frittage	PSSN, HPSN, HIPSN

On produit le nitrure de silicium lié par réaction (RBSN) par l'une des quatre méthodes suivantes :

- ° nitruration partielle d'une forme matricée isostatiquement à partir de poudre de silicium finement divisée, suivie d'une mise en forme finale par meulage et d'une nitruration complète dans une atmosphère d'azote;

- ° coulage en forme d'une pâte de poudre de silicium, suivi du soutirage du liquide, du séchage et de la nitruration du produit;

° pressage à froid d'une forme à l'aide d'une matrice avant de la nitrurer - c'est une technique particulièrement utile pour produire de grandes quantités d'une forme simple;

° moulage de poudre fine de silicium par injection, suivi par le brûlage du liant et la nitruration.

Ces quatre méthodes sont toutes utilisées commercialement. En Angleterre, par exemple, deux compagnies, Advanced Materials Engineering Ltd. et AE Developments Ltd. fabriquent ce produit à des fins commerciales depuis un certain nombre d'années. AE Developments Ltd. commercialise ses produits sous le nom de NITRASIL.

Le nitrure de silicium fritté sous pression (PSSN) est produit à partir d'une poudre de nitrure de silicium. La poudre est façonnée en corps vert par une ou l'autre des techniques de mise en forme et est ensuite frittée sous une pression élevée d'azote pour empêcher la volatilisation de l'azote et du silicium aux hautes températures atteintes lors du frittage (>1600 °C). Cette méthode n'est pas utilisée commercialement.

Dans les techniques de pressage à chaud (HP) et de matriçage isostatique à chaud (HIP), le matériau de départ est la poudre de nitrure de silicium. Dans le premier procédé, la poudre est mélangée à des aides de frittage convenables pour réduire la température du frittage et le façonnage, tout comme le frittage, se produit durant le procédé de pressage à chaud. Dans le procédé de matriçage isostatique à chaud (HIP), la poudre de nitrure de silicium est préformée par n'importe laquelle des méthodes de mise en forme (généralement la technique de moulage par injection) et frittée dans le four HIP. On peut aussi utiliser cette méthode pour éliminer les défauts microstructuraux des produits fabriqués par d'autres procédés.

Dans le procédé au nitrure de silicium fritté (SSN), la poudre de nitrure de silicium est mélangée aux quantités requises des aides de frittage (l'oxyde d'yttrium, Y_2O_3 est le produit que l'on utilise de préférence), façonnée selon la forme désirée et frittée dans l'azote sous la pression d'une atmosphère.

Le procédé de liaison par réaction après frittage (PSRBSN) sert à améliorer les propriétés des éléménts produits par le procédé RBSN.

État et orientations de la technologie

Bien qu'il y ait certaines divergences d'opinion dans la communauté technique, l'unanimité semble se faire sur le fait qu'on acceptera, de préférence, le nitrure de silicium, comme matériau de départ, mais pas nécessairement pour toutes les applications. Les problèmes qui restent encore à résoudre sont les suivants :

- la production commerciale de poudre de nitrure de silicium bien caractérisée. Il sera nécessaire d'atteindre la fiabilité des propriétés du produit et un coût assez bas (20 $ US/kg);

- la mise au point des technologies de procédés pour fabriquer des éléments faciles à reproduire et ayant des propriétés fiables. La réduction des coûts de fabrication par des techniques de façonnage se rapprochant de très près de la forme définitive et permettant d'éliminer l'étape coûteuse de la finition est particulièrement importante;

- la mise au point de méthodes d'essais non destructifs est essentielle pour obtenir l'acceptation commerciale des éléments;

- l'élimination des obstacles à la méthodologie de la conception technique. Les matériaux céramiques exigent des critères et des techniques de conception qui sont bien différents de ceux qu'on utilise pour les métaux. Il s'ensuit qu'on ne peut pas remplacer simplement les pièces métalliques par des produits céramiques sans faire une nouvelle étude technique du système.

Les remarques ci-dessus s'appliquent également aux autres matériaux : carbure de silicium, sialon et zircone. La figure 12 présente l'étendue des études technologiques et scientifiques présentement en cours pour commercialiser les néo-céramiques.

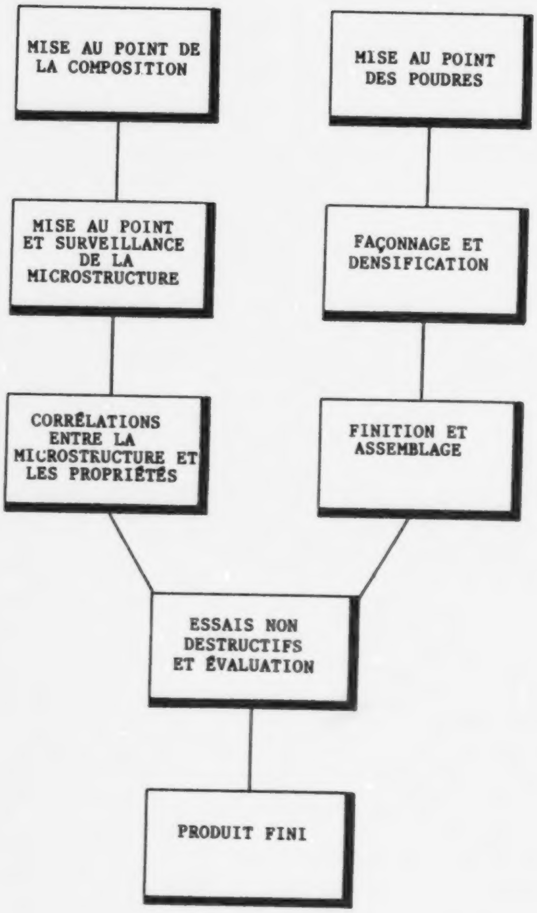
3.3.3.2 Sialon $Si_{6-x}Al_xN_{8-x}O_x$

Des chercheurs travaillant en Angleterre et au Japon au début des années soixante-dix ont découvert séparément les sialons. En Angleterre, la découverte a été faite au Wolfson Research Centre for High-Strength Materials, de l'université de Newcastle-Upon-Tyne à la suite de travaux financés par la compagnie Joseph Lucas Ltd. et la Wolfson Foundation. Au Japon, la découverte a été faite par la société Toshiba et la compagnie Toyota Motor.

On peut représenter la composition des sialons par la formule suivante :

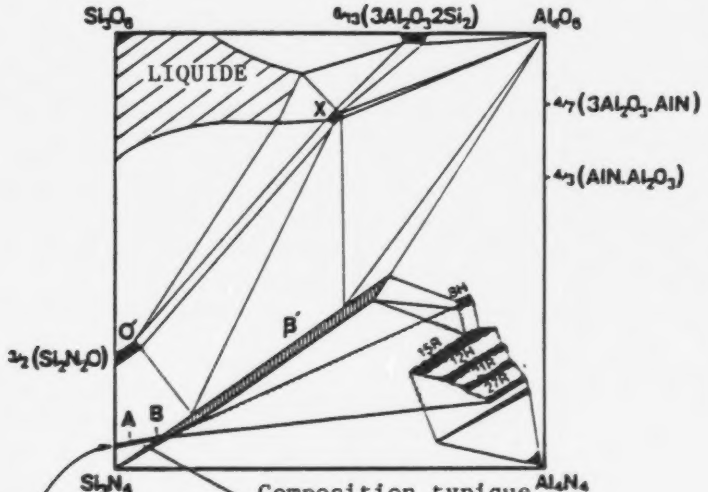
$$Si_{6-x}Al_xN_{8-x}O_x$$

où "x" indique le nombre d'atomes d'azote remplacés par des atomes d'oxygène. Le degré de substitution peut être modifié pour produire une vaste gamme de matériaux ayant une grande diversité de propriétés. La valeur maximale de "x" est de 4,2.



<u>FIGURE 12</u> : Étendue des études scientifiques et technologiques pour la commercialisation des néo-céramiques.

Les sialons sont produits par synthèse en faisant réagir des quantités appropriées de nitrure de silicium, de silice, d'alumine et de nitrure d'aluminium pour donner les compositions indiquées dans le diagramme ci-dessous :



Poudre de Si_3N_4 typique

Composition typique des céramiques de sialon

La méthode brevetée Lucas comporte l'utilisation de poudre de nitrure de silicium de phase-alpha élevée qui est mélangée avec de l'oxyde d'aluminium polymorphe et de l'oxyde d'yttrium, qui aide au frittage en phase liquide. On peut produire une variété de compositions de sialon utiles qui donnent plusieurs constituants microstructuraux différents. Au point de vue commercial on a identifié deux groupes de matériaux. Le matériau de verre x fait preuve d'une grande résistance à la température ambiante, mais à plus de 1000 °C sa résistance diminue rapidement par suite du ramollissement du verre intergranulaire. Par contre, le matériau YAG-bêta a une résistance inférieure à la température de la pièce, mais conserve sa force et sa résistance au fluage jusqu'à 1400 °C.

Techniques de fabrication

On peut fabriquer les céramiques au sialon par les techniques normales de traitement des céramiques décrites plus haut. Le procédé utilisé en pratique dépend des propriétés requises et des exigences imposées par l'application, sur le plan de la taille, de la forme, etc.

Applications

On a déjà utilisé les matériaux de sialon dans un certain nombre d'applications industrielles, par exemple : outils coupants, soudage, matrice d'extrusion, joints d'étanchéité et paliers, plaques de blindage dans les mines, manutention de métaux en fusion, pièces d'usure et produits réfractaires.

Production commerciale

En juin 1983, la compagnie Lucas a annoncé qu'elle s'était associée au Cookson Ceramics Group pour constituer une nouvelle compagnie en copropriété sous le nom de Lucas Cookson Syalon Ltd., dont les installations sont situées à Solihull, Angleterre. Le groupe Lucas Cookson a entrepris la commercialisation poussée de leur technologie et a conclu des accords d'autorisation de production avec un certain nombre de compagnies dont Sandvik en Suède, Kennametal et Carborundum aux États-Unis, NGK et Hitachi au Japon. Sandvik, Kennametal et NGK utilisent cette technologie pour la fabrication d'outils coupants.

3.3.3.3 Carbure de silicium (SiC)

Généralités

Le carbure de silicium est un matériau ancien dont l'utilisation industrielle remonte à loin. Cependant, ce n'est que depuis peu qu'on a reconnu son importance en céramique, longtemps, en fait, après que le nitrure de silicium eut atteint la place éminente qu'il occupe aujourd'hui. Jusqu'à un certain point, les problèmes initiaux affectant le carbure de silicium, en particulier les problèmes de frittage, ont déclenché les travaux qui ont mené à la mise en valeur

du carbure de silicium. On s'est aussi rendu compte, ce qui n'est pas sans importance, qu'on ne peut se conformer à des exigences techniques diverses avec un seul matériau comme le nitrure de silicium et qu'il est nécessaire de recourir à une variété de produits.

Une évaluation des propriétés intrinsèques du produit par rapport à celles de quelques autres matériaux covalents a démontré que le carbure de silicium présentait certains avantages dont, en particulier, une résistance aux chocs thermiques. On a de plus découvert que le module d'élasticité supérieur et la température de sublimation du carbure de silicium constituaient des caractéristiques désirables dans le cas de rendement à haute température.

Le carbure de silicium existe sous deux formes cristallines : la forme alpha a une structure hexagonale et la forme bêta a une structure cubique. On connaît la forme alpha depuis longtemps et c'est cette forme cristalline qui existe présentement sur le marché. Quant à la forme bêta elle est nouvelle et on y accorde beaucoup d'intérêt parce qu'on peut la fritter sans pression.

Production

Colson et Schutzenberg ont été les premiers à produire du carbure de silicium en 1881, mais la découverte en est généralement attribuée à Acheson qui a produit une petite quantité de ce matériau en 1891 en faisant passer un fort courant électrique d'une électrode de carbone à un mélange d'argile et de coke. Après avoir reconnu les propriétés abrasives du matériau, Acheson fonda la Carborundum Company et, en 1893, disposait d'une installation capable de produire 7 tonnes par an de carbure de silicium destiné spécialement aux polisseurs de pierres précieuses en plus de servir de matériau de remplacement pour la poussière de diamant.

La plus grande partie de la poudre de carbure de silicium utilisée aujourd'hui est produite par le procédé Acheson. Du sable de silice de haute qualité et du carbone sous la forme de coke ou d'anthracite entrent en réaction dans un four à arc électrique. La formule de la réaction globale est :

$$SiO_2 + 3C \longrightarrow SiC + 2CO$$

Les amas de cristaux de carbure de silicium provenant du four sont brisés, puis broyés et nettoyés en les traitant avec des acides ou des produits alcalins, lavés et finalement séchés. Les grains bruts de carbure de silicium sont de nouveau broyés, classifiés par taille puis passés sur des aimants pour enlever la contamination due au fer provenant des broyeurs. La préparation des diverses grosseurs de poudres tamisées exige une usine de traitement spécialisée comportant des systèmes de broyage, de tamisage et de séparation/décantation des particules fines. La poussière la plus

fine généralement produite mesure environ 10 microns (1250 mailles). Pour les utiliser dans les moteurs, il faut des poudres plus fines qu'on obtient en les broyant davantage dans des broyeurs de carbure de silicium. Cette étape additionnelle de broyage pour obtenir des poudres mesurées en microns ou même plus fines est susceptible d'accroître de façon sensible le prix des poudres.

On a récemment mis au point des méthodes de production commerciales permettant d'obtenir du carbure de silicium de forme bêta.

La production commerciale du carbure de silicium a atteint environ 400 000 tonnes par an en 1960. Au début des années soixante-dix, la production de carbure de silicium dans le monde libre avait atteint un sommet d'environ 475 000 tonnes par an, mais elle est retombée, en 1981, à environ 400 000 tonnes par an.

Durant de longues années, la production du carbure de silicium s'est faite en Amérique du Nord et en Europe dans des régions où on disposait de sources peu coûteuses d'énergie électrique. Par le passé, l'énergie hydro-électrique constituait la source d'énergie la plus économique et l'industrie du carbure de silicium s'est donc installée autour de Niagara Falls. En Europe, on la retrouvait en Norvège, en France, en République fédérale d'Allemagne, en Italie et en Suisse. Une grande partie de l'industrie est encore concentrée dans ces régions, bien qu'on ait établi des points de production ailleurs, soit pour répondre aux besoins d'un grand marché comme au Japon,ou pour tirer profit d'une autre source d'énergie économique comme l'usine ESK, en Illinois, aux États-Unis.

Au Canada, cinq entreprises exploitent six installations de production soit près du fleuve Saint-Laurent et dans les environs de Niagara Falls, en Ontario. Ce sont les entreprises suivantes : Canadian Carborundum Ltd., Electro Refractories & Abrasive Canada Ltd., Exolon Company, General Abrasive Company et Norton Company of Canada. Presque tout le carbure de silicium brut fabriqué au Canada est expédié aux États-Unis pour y être broyé et traité.

On peut grouper comme suit la consommation de carbure de silicium pour les applications industrielles :

Application	Consommation estimée en pourcentage (%)
Abrasifs	40
Produits réfractaires	30
Métallurgie	25
Électricité, et autres applications	5

Les chiffres ci-dessus sont des moyennes pour les marchés du monde libre. Au Japon, toutefois, la fabrication de produits réfractaires absorbe environ 75 % de la production locale, suivie par les abrasifs (15 %), les applications métallurgiques et les autres utilisations (10 % respectivement).

Fabrication des éléments de carbure de silicium

Toutes les techniques de fabrication et de traitement des céramiques décrites plus haut sont utilisées dans la fabrication des éléments en carbure de silicium. Le frittage du carbure de silicium destiné à assurer une densité élevée est affecté par des impuretés, particulièrement par l'oxygène et le silicium élémentaire. C'est pourquoi on ajoute des produits pour améliorer le frittage comme le bore et le carbone libre. On a aussi trouvé avantageux d'utiliser au départ du carbure de silicium-bêta plutôt que du carbure de silicium-alpha parce que le taux de croissance du premier est beaucoup plus faible que celui du second.

Quatre types de produits de carbure de silicium utilisables dans des applications techniques, sont fabriqués commercialement. Ce sont :

- Refel SiC
- KT SiC
- Noralide SiC
- CVD SiC

Refel - SiC

Le Refel-SiC est un carbure de silicium à liaison autonome fabriqué et mis sur le marché en vertu d'un permis par la compagnie British Nuclear Fuels Ltd. (BNFL). Mis au point initialement par UKAEA comme un enrobage pour le combustible nucléaire dans des réacteurs à haute température refroidis au gaz, on a fabriqué et mis sur le marché le Refel-SiC depuis le début des années soixante-dix.

Dans ce procédé, on mélange du carbure de silicium-alpha et des poudres de graphite avec un liant approprié, on lui donne la forme voulue et on procède au frittage. En ajustant la proportion entre le carbure de silicium et le graphite, on fixe la teneur en silicium libre au niveau désiré. Dans tous les cas, il reste au moins 8 % de silicium libre dans un produit qui est parfaitement dense et imperméable. Il est possible de fabriquer des formes complexes en usinant les pièces vertes avant la combinaison avec le silicium, ou après, par le meulage au diamant. La combinaison avec le silicium se fait dans une chambre où on a pratiqué un vide partiel et où du monoxyde de silicium s'évaporant d'un bain de silicium dans lequel le corps est placé réagit avec la couche de surface extérieure du corps à une température de 1600 °C à 1700 °C. Le corps intérieur agit comme une mèche à travers laquelle le silicium se déplace vers le haut par action capillaire en réagissant exothermiquement avec le graphite libre pour former du carbure de silicium-bêta et laisser un excédent de silicium dans une matrice ininterrompue à travers la structure.

KT-SiC

Le KT-SiC est un produit de la Carborundum Company; il est mis en forme de la même façon que le Refel-SiC.

Noralide-SiC

Le Noralide NC-400, un produit de la Norton Company, fait de carbure de silicium recristallisé relativement pur (99 % au moins de pureté) préparé par le concassage et le broyage de carbure de silicium brut pour obtenir une distribution granulométrique bimodale particulière. Contrairement aux procédés de siliconisation décrits ci-dessus, le matériau est fritté dans une zone de température de 2100 °C à 2450 °C, la température exacte dépendant de la microstructure désirée et des conditions de service en utilisation.

CVD-SiC

On peut déposer du carbure de silicium sur des substrats appropriés à des températures variant de 1200 °C à 1700 °C, en partant de produits de décomposition du méthylchlorosilane ou d'autres composés semblables. En optimalisant ce procédé, il est possible d'obtenir des revêtements stoïchiométriques denses.

3.3.3.4 Zircone (ZrO_2)

Généralités

On connaît depuis longtemps les céramiques de zircon ($ZrSiO_4$) et de zircone (oxyde de zirconium, ZrO_2). Toutefois ce n'est que depuis quelques années que la zircone est devenue un matériau céramique technique très important après que l'Agence de recherche scientifique et industrielle du Commonwealth australien, eut découvert, en 1975, qu'il était possible d'améliorer considérablement ses propriétés mécaniques en contrôlant sa microstructure. En réalité, pour certaines applications, surtout dans les moteurs Diesel, il est préférable au nitrure et au carbure de silicium à cause de sa plus faible conductivité thermique et de son coefficient de dilatation thermique qui est compatible avec celui de la fonte.

Production de la poudre de zircone (ZrO_2)

Les deux minerais les plus importants desquels on peut récupérer la zircone sont : la baddeleyite, la forme minérale de l'oxyde et le zircon qui est un silicate dont la formule est $ZrSiO_4$. Le zircon est, des deux, le plus commun et le plus largement réparti; on l'extrait de gisements importants en Australie, en Inde, en Afrique du Sud et aux États-Unis. On utilise la plus grande partie de la production à la fabrication de produits réfractaires, mais ce minerai

constitue aussi le matériau essentiel à la fabrication des produits chimiques de zircone et de zirconium. La production mondiale du minerai est de 650 000 tonnes dont 430 000 en Australie. Après traitement, le minerai sud-africain donne un matériau qui contient de 96 à 98 % d'oxyde de zirconium. On l'utilise surtout dans la fabrication d'abrasifs et de produits réfractaires Al_2O_3-ZrO_2. Au Canada, on a découvert un vaste gisement contenant de la zircone (ZrO_2) au nord de Schefferville, au Québec; ce gisement appartient à la compagnie Iron Ore du Canada. On pourra en tirer profit commercialement, si le marché des applications techniques de la zircone prend plus d'ampleur à l'avenir.

On recourt à deux types de procédés différents pour la production des poudres de zircone : les procédés chimiques et le procédé au plasma. Il y a trois types de procédés chimiques utilisés pour la récupération de la zircone. Dans le procédé de chloration et de décomposition thermique, le zircon est chloré directement en présence de carbone dans la gamme de températures de 800 °C à 1200 °C pour obtenir le $ZrCl_4$ qui est hydrolysé avec de l'eau pour donner de l'oxychlorure de zirconium; la calcination de l'oxychlorure produit de la zircone sous forme granulaire. Dans le procédé de décomposition alcaline, qui est la méthode la plus courante pour la fabrication de l'oxyde pur et des produits chimiques, on fait réagir les minerais avec de l'hydroxyde de sodium pour former du zirconate de sodium qui est ultérieurement converti en oxyde par l'action du sulfate de zirconium. Dans le procédé de fusion à la chaux, le minerai entre en réaction avec de la dolomite dans la gamme de températures de 1100 °C à 1600 °C et on peut obtenir l'oxyde de zirconium directement des produits de la réaction. Dans le procédé au plasma, le minerai, sous forme de poudre, est amené directement dans l'arc sous plasma pour y être décomposé en oxyde de zirconium et on récupère le produit en le traitant avec de la soude caustique.

" Stabilisation " et " durcissement " de la zircone

La zircone pure, ZrO_2, n'est pas un matériau céramique utile parce qu'il passe par des transformations cristallographiques accompagnées de changements de volume qui entraînent la fissuration de la céramique pendant le cyclage thermique. Il est cependant possible d'en faire un matériau utile par les deux techniques de " stabilisation " et de " durcissement par transformation ". La première technique date de plusieurs décennies mais la deuxième n'a été découverte qu'en 1975.

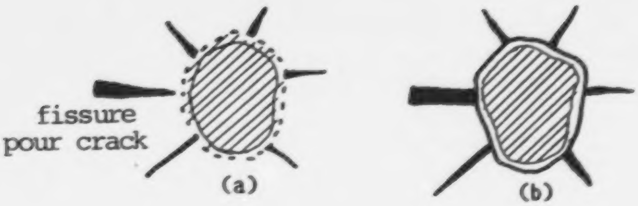
On peut stabiliser la zircone par l'incorporation d'additifs d'oxydes appropriés et on connaît le matériau stabilisé sous le nom de " zircone partiellement stabilisée " ou PSZ. Le bioxyde de zirconium présente trois modifications polymorphes bien définies dépendantes de la température, à savoir les phases monocliniques, tétragonales et cubiques. La forme monoclinique est stable depuis la température de

la pièce jusqu'à 1000 °C où elle se transforme en phase tétragonale. Cette dernière est stable jusqu'à 1900 °C. A cette température, la zircone reprend la forme trigonale et reste stable jusqu'au point de fusion situé à environ 2700 °C.

La transformation tétragonale-monoclinique est très importante au point de vue technique parce qu'elle s'accompagne d'un grand changement de volume (de 3 à 5 %) ce qui peut entraîner le fendillement des particules individuelles. La technique de la stabilisation à la chaux est connue depuis plusieurs décennies et on a utilisé les matériaux stabilisés pour un certain nombre d'applications comme les produits réfractaires. On a mis au point des produits améliorés en stabilisant la structure avec l'oxyde de magnésium (MgO) et l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3) au cours des dernières années. Suite à la demande commerciale, on a mis sur le marché des gammes de produits en poudre contenant entre 0 et 20 % en poids d'additifs de CaO, MgO et Y_2O_3; ces produits correspondent généralement aux compositions qui donnent la zircone partiellement stabilisée. Par exemple, la Magnesium Electron Company, la filiale britannique de la compagnie Alcan, met sur le marché les produits suivants :

Oxyde stabilisateur	Pourcentage en poids (%)			
CaO	4	5,5	8	10
MgO	4	5,0	8	21
Y_2O_3	4	6,0	8	16

Les céramiques durcies à la zircone, auxquelles on donne aussi le nom de ZTC, ont commencé à voir le jour après qu'on eut découvert, en 1975, qu'il est possible d'augmenter considérablement la résistance et la dureté de la zircone en utilisant la dilatation en volume et l'effort de cisaillement qui se produisent dans la transformation tétragonale-monoclinique (t-m) pour maîtriser sa microstructure et par le fait même ses propriétés. On reconnaît généralement que la transformation t-m peut donner naissance à un durcissement de transformation amélioré déclenché par les contraintes. Dans le premier cas, on réalise le durcissement par l'incorporation de particules de ZrO_2 dans une gangue céramique (ZrO_2 cubique ou une autre céramique comme Al_2O_3). En passant par la température de transformation, lors du refroidissement, la dilatation en volume de 3 à 5 % qui se produit dans les particules de ZrO_2 entraîne la formation d'une fissure comme l'indique le schéma suivant.



La transformation martensitique qui se produit dans le ZrO_2 (tétragonale à monoclinique à 900 °C - 1100 °C) avec sa dilatation de 3 % à 5 % en volume donne naissance à des microfissures autour des particules de ZrO_2 (a). Une fissure se propageant dans la particule est déviée et bifurque (b), augmentant ainsi la résistance mesurée à la fracture.

Des efforts tangentiels se produisent autour de la particule transformée et provoqueront des microfissures dans la gangue. Comme ces microfissures sont capables de s'étendre dans la zone des contraintes d'une fissure en voie de propagation ou de faire dévier la fissure en voie de propagation, elles peuvent absorber ou dissiper l'énergie de la fissure, augmentant ainsi la " dureté " de la céramique. On obtient les conditions optimales quand les particules sont assez grosses pour se transformer mais assez petites pour causer une propagation restreinte des microfissures. Pour arriver à la dureté maximale, la fraction en volume des inclusions de ZrO_2 doit être à un niveau optimal.

Le " durcissement " par transformation provoqué par les contraintes dépend du fait qu'on peut prévenir la transformation t-m soit en maintenant la taille des inclusions de ZrO_2 en bas d'un niveau critique ou en exerçant une pression de contrainte sur ces inclusions par la gangue, c'est-à-dire que les particules de ZrO_2 sont maintenues en pseudo-équilibre stable dans la forme tétragonale. Ces particules fines peuvent être introduites comme une seconde phase au cours de la fabrication initiale, (par exemple, la zircone dans l'alumine), ou peuvent être développées, comme une seconde phase aussi par traitement thermique, durant ou après le frittage.

L'étude technique microstructurale des céramiques durcies par la zircone constitue un domaine de recherches très actives maintenant, à cause de leurs possibilités d'utilisation pour les moteurs ou les autres applications où la résistance à l'usure est essentielle. On a entrepris l'étude de trois groupes de matériaux :

° les céramiques à base de zircone partiellement stabilisée;
° les céramiques contenant du zircone dispersée;
° les systèmes de zircone complexes

Fabrication des éléments de céramique

Les éléments de céramique de zircone monolithes (PSZ) sont fabriqués selon les méthodes ordinaires de traitement des céramiques.

Pour de nombreuses applications techniques (aubes de turbine, éléments de moteurs Diesel, produits résistant à l'usure), on utilise des revêtements. Les revêtements sont appliqués par les techniques au plasma. Un certain nombre de compagnies, dont Metco qui a des installations de fabrication et de distribution aux États-Unis, au Canada, en Europe et au Japon, font la mise en marché de l'outillage, des matériaux et de la technolgoie nécessaires.

3.3.4 Néo-céramiques fonctionnelles

3.3.4.1 Généralités

La catégorie des néo-céramiques " fonctionnelles " comprend des céramiques dont on utilise les propriétés fonctionnelles électriques, électroniques, magnétiques, optiques, chimiques, biologiques et nucléaires. D'après leurs utilisations, on les regroupe généralement comme suit :

- ° Céramiques électroniques
- ° Céramiques chimiques et biologiques
- ° Céramiques nucléaires

3.3.4.2 Céramiques électroniques

L'application des céramiques électroniques dépend de leurs propriétés électromagnétiques, c'est-à-dire que leurs propriétés découlent des interactions des électrons (ou ions) de leur structure, soit entre eux soit avec les champs extérieurs. On classifie les éléments céramiques selon leurs propriétés électromagnétiques de la façon suivante :

- ° Céramiques isolantes
- ° Céramiques diélectriques
- ° Céramiques piézo-électriques
- ° Céramiques pyroélectriques
- ° Céramiques magnétiques
- ° Céramiques opto-électroniques
- ° Semi-conducteurs
- ° Conducteurs ioniques

Les céramiques isolantes sont non-conductrices. Elles sont ordinairement faites d'alumine, Al_2O_3, et elles servents souvent de substrats pour les circuits électroniques, y compris le microcircuits et les microcircuits linéaires, à cause de leurs

TABLEAU 2

Propriétés des matériaux céramiques de support

Propriétés	Unités	Matériaux			
		AlN	Al_2O_3	BeO	SiC
Conductivité thermique	W/mK	100	20	250	270
Résistivité	10^{14}ohms/cm	-1	-1	-1	-1
Tension de claquage	kV/cm	140	100	100	0,7
Constante diélectrique	aucune	8,8	8,5	6,5	40
Tan delta	10^4	5-10	3	5	500
Dilatation thermique	10^{-6}/C	4,5	7,3	8	3,7
Densité	g/cm^3	2,8	3,7	3,2	4,8
Résistance	kg/mm^2	45	23	20	45

Source : Toshiba.

excellentes caractéristiques à savoir : surfaces lisses et uniformes, facilité de traitement, excellente résistance mécanique, stabilité chimique élevée, non-conductivité élevée à haute fréquence et conductivité thermique relativement élevée qui permet un transfert de chaleur rapide. Cependant, par suite de la miniaturisation des circuits électroniques, le besoin de matériaux ayant une conductivité thermique supérieure s'est accru. On est en train de mettre au point un certain nombre de matériaux compétitifs. On peut mentionner parmi eux : le nitrure d'aluminium (AlN), l'oxyde de beryllium (BeO), et le carbure de silicium (SiC). Le tableau 2 ci-après fait la comparaison entre les propriétés de ces divers matériaux.

On connaît depuis longtemps les céramiques diélectriques et, à cause de leur capacité de stocker temporairement l'électricité par polarisation diélectrique, elles constituent d'excellents matériaux pour les condensateurs, qui sont parmi les plus importants de tous les éléments électroniques. Par exemple, les appareils stéréo comportent plus de 50 condensateurs alors que les appareils de télévision et les magnétoscopes à ruban contiennent chacun entre 100 et 200 condensateurs. Le titanate de baryum, $BaTiO_3$, est le matériau généralement utilisé pour la fabrication de ces éléments. Il est nécessaire de disposer de matériaux céramiques diélectriques améliorés et supérieurs pour se conformer à des besoins complexes qui résultent de la mise au point de la technologie des microplaquettes, particulièrement pour les applications à haute fréquence. On poursuit actuellement d'actives recherches basées sur d'autres céramiques ferroélectriques comme le niobate de sodium, $NaNbO_3$. Murata Erie Canada est le seul fabricant canadien de ce produit.

Les céramiques piézo-électriques sont des matériaux céramiques spéciaux qui sont capables d'assurer l'interconversion des énergies électrique et mécanique, c'est-à-dire qu'elles peuvent convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et vice-versa. Elles jouent un rôle très important dans un certain nombre d'applications comme : les filtres, les résonateurs d'horloge pour les micro-ordinateurs, les avertisseurs, les détecteurs ultrasoniques, les détecteurs de tension sanguine et les détecteurs de communication. Elles sont très importantes pour les utilisations sous-marines, civiles aussi bien que militaires. Le matériau le plus utilisé présentement est un matériau à base de zirconate de plomb et de titanate de plomb, généralement connu sous l'abréviation, PZT. La demande de nouveaux matériaux piézo-électriques de meilleure qualité a augmenté considérablement à cause des besoins de la défense, particulièrement aux États-Unis. Il existe une forte activité commerciale au Canada dans ce domaine : les entreprises Almax Industries, Lakeside Electronics et BM Hi-Tech sont des sociétés actives dans la fabrication des produits ainsi que dans la recherche et le développement.

Les céramiques pyroélectriques sont un groupe spécial de matériaux piézo-électriques. Elles réagissent aux plus légères variations de température. Elles sont, par exemple, très sensibles aux radiations infra-rouges et servent à la fabrication d'alarmes-incendie, d'alarmes contre les cambrioleurs, de détecteurs d'infrarouge, etc.

On connaît et on utilise depuis plusieurs décennies les céramiques magnétiques, connues aussi sous le nom de ferrites. On utilise deux types de ferrites. Les ferrites dures, qui sont des matériaux magnétiques permanents et sont basées sur l'hexaferrite de baryum, $BaO.6Fe_2O_3$, servent principalement à la fabrication de hauts-parleurs et à d'autres applications. Les ferrites tendres, basées sur le composé $MnZnFeO_4$, agissent comme matériaux magnétiques en présence d'un champ électrique et servent à une vaste gamme d'applications comme les appareils de télévision, les antennes et les rubans magnétiques. Le seul manufacturier au Canada est la compagnie Neosid. La compagnie Northern Pigment produit et met sur le marché des oxydes de fer servant à la fabrication des ferrites.

Il y a trois domaines importants où l'on peut utiliser les céramiques opto-électroniques : les fibres optiques, les fenêtres optiques et les filtres optiques. On utilise surtout les fibres optiques dans les systèmes de communications par fibres optiques, y compris les télécommunications commerciales, les communications militaires et les liaisons de communications des données entre les ordinateurs. Il y a d'autres utilisations finales possibles dont la détection optique, le traitement des signaux optiques et la mécanographie optique. Une nouvelle technologie appelée circuits optiques intégrés est en voie de développement aux États-Unis, au Japon aussi bien qu'en Europe; on s'attend à ce que cette technologie offre un rendement remarquable et des économies de coût considérables dans les systèmes à fibres optiques; il se présente toutefois un certain nombre d'obstacles techniques qui devront être éliminés avant que ces produits puissent être acceptés commercialement et utilisés à grande échelle. Au Canada, la compagnie Canstar Communications, de Winnipeg, une filiale de Câbles Canada Ltée, fabrique des câbles de fibres optiques qui seront utilisés dans les liaisons de communications transcanadiennes que sont en train d'établir CN Rail et CNCP. Les compagnies Bell Northern et Northern Telecom Canada sont aussi actives dans ce domaine.

Les céramiques semi-conductrices servent à un certain nombre d'applications comme les thermistors PTC qui commandent la température (posistors), les éléments chauffants, les dispositifs de sécurité pour les appareils électroniques (varistors), et autres. C'est un domaine fourmillant d'activités à cause des besoins des industries de haute technologie. Il existe une forte activité au Canada dans le champ des semi-conducteurs dans les laboratoires des industries, des universités aussi bien que des gouvernements.

Les conducteurs ioniques sont des matériaux relativement nouveaux qu'on connaît sous le nom d'électrolytes à semi-conducteurs, ou encore, superioniques. Ces matériaux présentent la propriété très intéressante de conduire sélectivement soit les anions soit les cations tout en demeurant des isolateurs électroniques. Pour cette raison, les quelque 40 matériaux présentement connus ont potentiellement une grande diversité d'applications. Parmi ces applications, on peut mentionner : les éléments de fours à haute température, les détecteurs d'ions spécifiques à haute température, les accumulateurs à haute densité d'énergie, les cellules à combustible, les électrolyseurs, les génératrices thermoélectriques, les pompes à ions spécifiques, les minuteries et les coulombmètres, les transducteurs de pression et de température et les affichages électrochromiques. Le Canada poursuit depuis 1975 des activités de recherche et de développement dans ce domaine. Le groupe de la céramique de CANMET, ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, de même que les universités McMaster et Queen's sont actifs depuis un certain nombre d'années. Plus récemment, les compagnies Almax Industries et Magna International s'y sont intéressées commercialement, la deuxième, pour la fabrication d'accumulateurs au soufre et au sodium à haute densité destinés aux véhicules électriques.

3.3.4.3 Céramiques chimiques et biologiques

On utilise de la céramique depuis des dizaines d'années dans des applications faisant appel à leurs propriétés de résistance à la corrosion et de catalyse. Les produits réfractaires et les porcelaines chimiques, de même que les verres résistants aux produits chimiques sont bien connus. On a utilisé des catalyseurs à base d'alumine et d'aluminosilicates dans l'industrie pétrochimique. Par suite des améliorations apportées aux propriétés des matériaux céramiques utilisant les technologies de fabrication des néo-céramiques aussi bien que les caractéristiques favorables inhérentes des céramiques, on est en train de mettre au point de nouvelles applications; l'avenir semble très prometteur dans ce domaine.

L'utilisation des céramiques en biologie est relativement nouvelle. Compte tenu de l'importance présentement accordée à la biotechnologie, il semble se présenter d'excellentes occasions pour l'industrie dans le domaine des néo-céramiques, comme : les supports de catalyseurs spéciaux, les récipients à réaction, etc. On a entrepris, au Japon, la mise au point d'implants en néo-céramique et de dents à base de zircone; ces produits pourraient avoir un excellent potentiel de vente à l'avenir.

3.3.4.4 Céramiques nucléaires

Pour les applications nucléaires, les céramiques, en plus d'avoir une bonne résistance, doivent posséder de bonnes propriétés de résistance aux produits chimiques et aux radiations. Les premières de ces propriétés sont nécessaires au traitement des combustibles aussi bien qu'à la manutention des déchets nucléaires qui sont corrosifs. Les autres propriétés sont nécessaires dans la partie quincaillerie du système.

On a mis au point différents types de néo-céramiques pour répondre aux besoins spéciaux de l'industrie nucléaire. En réalité, on a développé le nitrure de silicium lié par réaction, à Harwell, pour ces fins précises. On utilise des produits de nitrure de silicium aussi bien que de carbure de silicium. Il faudra aussi produire des types spéciaux de matériaux isolants pour les sections à température élevée.

Les matériaux céramiques requis pour les réacteurs à fusion doivent démontrer des propriétés plus rigoureuses. Il semble bien qu'il y aura une augmentation considérable de la recherche et du développement dans ce domaine à cause de la possibilité d'utiliser des génératrices nucléaires dans l'espace pour les programmes de la Guerre des étoiles aux États-Unis.

4. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

4.1 Généralités

Les données étudiées à la section 3 indiquent de façon évidente que les néo-céramiques comme telles, démontrent des propriétés supérieures qui les rendent utiles dans une grande variété d'applications. Certaines de ces applications sont connues depuis relativement longtemps, par exemple l'électronique et les outils coupants. Néanmoins, grâce à la disponibilité de meilleurs matériaux, il a été possible de mettre au point des produits nouveaux qui sont technologiquement supérieurs ou qui assurent des avantages économiques importants. On peut regrouper les applications plus récentes en deux catégories. Tout d'abord, les applications où on peut utiliser avec avantage la technologie des matériaux présentement disponibles pour réaliser des bénéfices, par exemple, l'énergie, l'espace et les produits industriels. Deuxièmement, les applications potentielles futures exigeant une technologie des matériaux encore en évolution. De façon générale, on peut regrouper toutes ces applications en six catégories énumérées ci-après et présentées dans la figure 13.

- Moteurs d'automobiles et autres moteurs
- Outils coupants et pièces de machinerie
- Électronique et ingénierie
- Produits industriels
- Énergie et espace
- Produits de consommation

4.2 Automobiles et autres applications

4.2.1 Avantages de l'utilisation des céramiques

Les motifs principaux alimentant l'intérêt courant et les efforts fébriles déployés pour mettre au point et commercialiser les néo-céramiques en vue de leur utilisation dans les moteurs sont : la nécessité d'améliorer l'efficacité énergétique; la nécessité d'en arriver à pouvoir utiliser différents combustibles sans problèmes environnementaux néfastes; la nécessité de solutionner des problèmes de coût et de fourniture des matériaux; et, ce qui est plus important, la nécessité de réaliser des avantages économiques importants. Alors qu'au tout début, les besoins des forces armées constituaient le motif principal des études et de la recherche sur les néo-céramiques, aujourd'hui, ce sont les forces économiques et les besoins du marché qui ont pris plus d'importance.

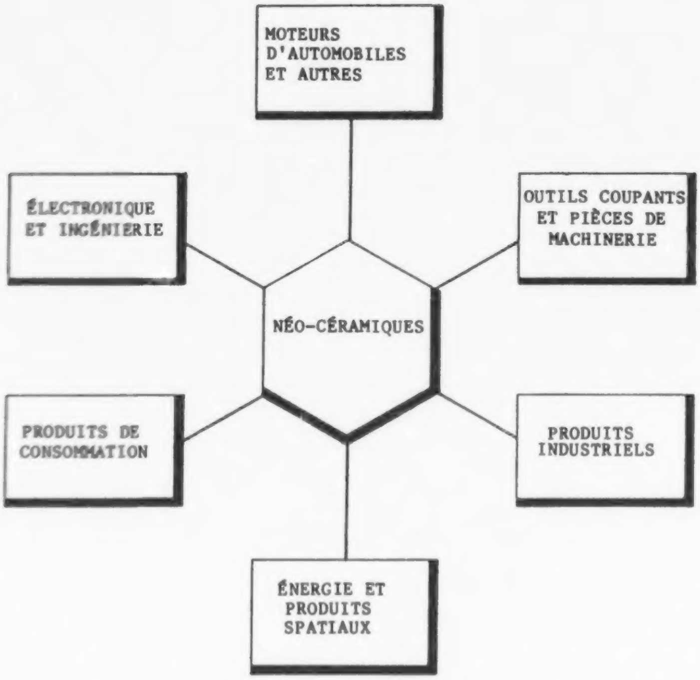


FIGURE 13 : Applications industrielles des néo-céramiques.

On procède présentement à la mise au point de matériaux à base de nitrure de silicium (Si_3N_4), de carbure de silicium (SiC) et de zircone en vue de leur utilisation dans les moteurs. Le nitrure de silicium et le carbure de silicium sont particulièrement intéressants à cause de leur résistance élevée à haute température, de leur bonne résistance aux chocs thermiques et de leur excellente résistance à la corrosion et à l'érosion. L'intérêt de la zircone vient du fait qu'elle a une dilatation thermique à peu près semblable à celle des autres matériaux utilisés dans les moteurs, une faible conductivité thermique, une dureté acceptable et une bonne résistance à l'oxydation. Cette combinaison de propriétés est désirable parce qu'elle permet d'accroître la température de fonctionnement des moteurs, ce qui entraîne une augmentation de l'efficacité du combustible. Le tableau 3 présente certains exemples typiques des gains énergétiques possibles qu'on peut réaliser avec diverses catégories de moteurs.

A cause de leur faible densité, les éléments de céramique pèsent jusqu'à 40 % de moins que les éléments métalliques. Ce poids et cette inertie inférieurs se traduisent par une amélioration du rendement du moteur.

Le coût constitue un autre avantage important. Comparativement aux superalliages présentement utilisés, on s'attend à ce que le coût des éléments de céramique soit sensiblement plus bas, quand on aura terminé les travaux de recherche et développement et qu'on aura mis sur pied des techniques de fabrication commerciale et de production en série. De plus, du point de vue de la sécurité nationale, les céramiques ont l'avantage de ne pas être des matériaux critiques parce que les matières premières nécessaires à leur fabrication sont abondantes et faciles à trouver.

La figure 14 ci-après présente schématiquement les avantages globaux de l'utilisation des néo-céramiques dans les moteurs.

4.2.2 État actuel du développement des moteurs

Des études se poursuivent présentement sur les différents types de moteurs suivants utilisant des éléments en céramique :

(i) Moteurs à turbine à gaz
(ii) Moteurs Diesel
(iii) Moteurs à essence

(i) Moteurs à turbine à gaz

On est en train de mettre au point trois utilisations importantes pour les moteurs à turbine à gaz. Ce sont :

° les moteurs d'avions;
° les moteurs d'automobiles;
° les moteurs fixes pour la production d'énergie

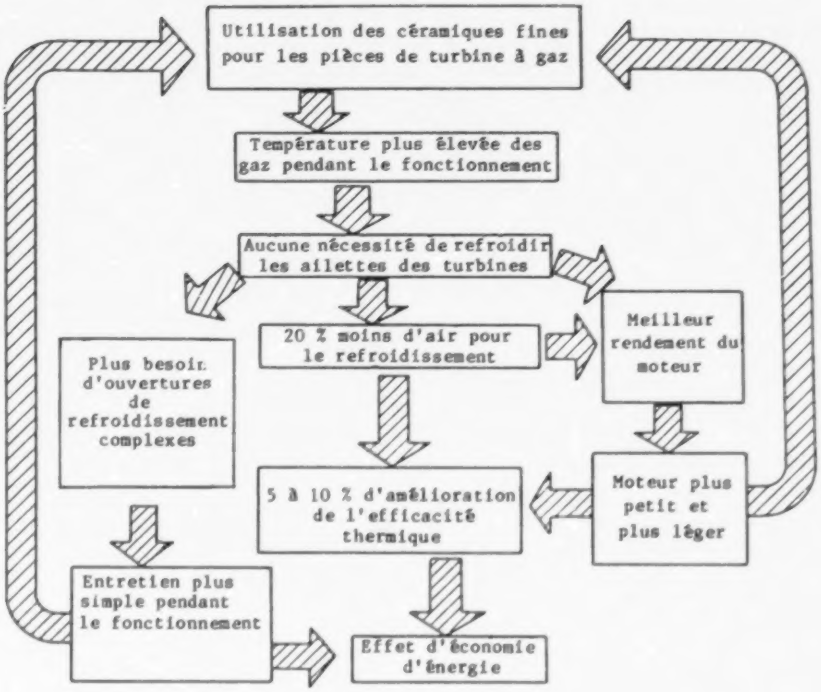
TABLEAU 3

Avantages technologiques des céramiques pour certains types de moteurs

Type de moteur	CV	Gamme de configuration	CSC*	Énergie
Automobiles GT	200	Regénéré, arbre unique 1350 °C, TIT **	-27 %	0
Camions FT	350	Regénéré, 2 arbres 1250 °C, TIT **	-27 %	+30 %
Navires légers GT	1000	Cycle simple, 3 phases 1350 °C, TIT **	-10 %	+40 %
Diesel	500	Turbo-compound adiabatique Tmax 1050 °C	-22 %	+37 %

*CSC - Consommation spécifique de combustible (gm/W-h), basée sur l'état actuel des connaissances.

**TIT - Température à l'entrée de la turbine.



<u>FIGURE 14</u> : Avantages économiques découlant de l'utilisation des néo-céramiques dans les moteurs.
Source : Long-Term Credit Bank Ltd., Japon.

Moteurs d'avions

On a initialement mis au point les moteurs à turbine à gaz en vue de leur utilisation dans les avions, particulièrement les avions militaires; on s'en sert aujourd'hui tant pour les avions militaires que civils.

L'efficacité du fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz s'accroît selon l'augmentation de la température à l'entrée de la turbine. Partant de cela, on a enregistré depuis le début des travaux de développement des progrès dans la poursuite de cet objectif, le facteur limitatif étant la disponibilité de matériaux capables de résister aux températures élevées. Bien qu'on ait fait des progrès remarquables par l'utilisation de meilleurs alliages pour en arriver à un point culminant avec les superalliages actuels, il reste encore de la place pour des améliorations importantes, aussi bien en ce qui a trait à des températures de marche plus élevées qui permettraient d'obtenir une efficacité énergétique encore supérieure qu'en ce qui concerne des réductions de coûts. Les données présentées dans la figure 15 illustrent de façon évidente les avantages qu'on peut retirer des matériaux faits de nitrure et de carbure de silicium.

A cause de la sécurité et de la régularité de marche requises, l'utilisation d'éléments de céramique monolithes dans les moteurs d'avion n'en est encore qu'à l'étape de la recherche et du développement. Cependant, on a reconnu très tôt que des revêtements de céramique pouvaient isoler les pièces des moteurs des gaz chauds de combustion et on les a utilisés pour réduire les températures du métal des aubes des turbines et les protéger contre la corrosion. Actuellement, on utilise commercialement des revêtements de néo-céramiques pulvérisés sous plasma. Presque tous les fabricants de moteurs d'avion poursuivent des travaux intensifs de recherche et de développement dans ce domaine, en particulier : United Technologies (Pratt & Whitney), General Electric Company, Garrett Corporation et Rolls Royce.

Moteurs d'automobiles

Le moteur d'automobile à turbine à gaz est semblable au moteur à turbine à gaz utilisé pour la propulsion des avions, sans lui être identique. Il produit de l'énergie en entraînant une turbine rotative à l'aide de gaz comprimé à haute température. Les moteurs d'automobiles à turbine à gaz ont plusieurs avantages possibles. Le plus grand avantage de ces moteurs est, naturellement, la plus grande efficacité de leur combustible comparativement aux moteurs alternatifs, qu'il s'agisse de moteurs à essence ou de moteurs Diesel. Parmi les autres avantages, on peut mentionner : bruit et émissions plus faibles; capacité d'utilisation de combustibles différents; consommation inférieure d'huile; capacité de mise en marche par temps froid; et plus faibles coûts répartis sur la durée de vie des moteurs. Dans les avions, les moteurs à turbine à gaz ont démontré qu'ils demandaient moins d'entretien et duraient plus longtemps que les moteurs à pistons.

Au cours de la dernière décennie, on a réalisé de grands progrès dans la mise au point des moteurs d'automobiles à turbine à gaz grâce à l'utilisation d'éléments de néo-céramique. On a choisi surtout le carbure de silicium et le nitrure de silicium pour les pièces des moteurs alors que pour les regénérateurs on a utilisé de préférence les aluminosilicates. Les principaux pays qui participent à la mise au point de cette technologie sont les États-Unis, la République fédérale d'Allemagne et la Suède.

Les États-Unis ont été le premier pays à entreprendre des programmes de recherche à grande échelle sur la conception et la mise au point de moteurs d'automobiles à turbine à gaz incorporant des éléments céramiques. Jusqu'ici, ils ont complété avec succès deux programmes de démonstration et deux nouveaux programmes sont en cours. Le programme FORD/DARPA a démontré qu'il était techniquement faisable d'incorporer des éléments de céramique, fixes aussi bien que rotatifs, dans les moteurs de turbine à gaz. Le programme de la division DOE/DDA de GM a réussi à démontrer qu'on pouvait utiliser un moteur à turbine à gaz sur un véhicule routier de façon courante et dans des conditions de marche réalistes. Le succès de ces deux programmes a déclenché la mise en route d'un quatrième programme en 1980, le programme " Advanced Gas Turbine " (AGT) (turbine à gaz évoluée). Il s'agit encore ici d'un programme de démonstration entièrement financé par DOE. Deux contrats parallèles ont été accordés : un à Detroit Diesel Allison Division de GM pour le programme AGT-100 dont le but est de mettre au point un moteur à turbine à gaz à deux arbres et d'établir son efficacité opérationnelle dans une automobile Pontiac Phoenix X de 1985; et l'autre à l'équipe GARRETT/FORD pour le programme AGT 101 dont l'objectif est la mise au point d'un moteur à arbre unique qui conviendrait aux voitures automobiles de fabrication FORD. Les deux programmes se poursuivent encore aujourd'hui et devraient se terminer en 1990.

Jusqu'ici, la République fédérale d'Allemagne a aussi fait des progrès remarquables dans la mise au point des moteurs à turbine à gaz pour les voitures automobiles et les autres véhicules. Dans le cadre d'un programme national spécial lancé en 1974, trois fabricants de moteurs et sept fabricants de céramiques ont participé à cette recherche. Les trois fabricants d'automobiles étaient : Volkswagen, Daimler Benz et MTU. Le tableau 4 ci-après présente en résumé le programme de mise au point des fabricants de céramiques.

Volkswagen a fait des travaux de recherche et développement considérables sur l'évaluation du comportement des éléments de céramique dans des conditions d'essais simulées. Cependant, Daimler Benz a construit aux fins d'observation un moteur contenant des éléments de nitrure de silicium et l'a incorporé dans un véhicule qui a donné d'excellents résultats lors des essais sur route. La compagnie poursuit ses travaux dans l'espoir de pouvoir en commercialiser les résultats plus tard.

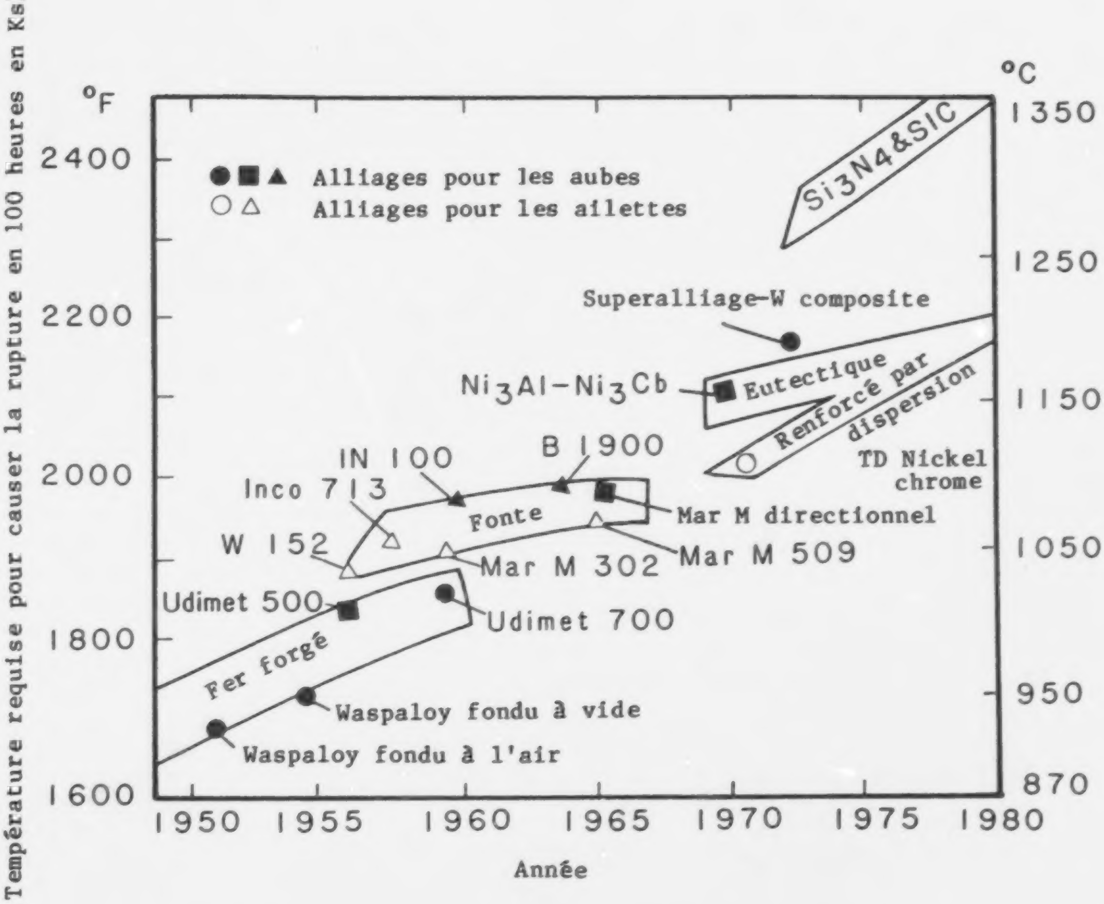


FIGURE 15 : Orientations de l'utilisation des matériaux pour les moteurs à turbine à gaz.

En Suède, les compagnies Volvo et SAAB travaillent activement à la mise au point de moteurs à turbine à gaz, avec le concours d'un certain nombre de compagnies de céramique, dont ASEA. De concert avec la compagnie United Turbine KTT, Volvo a entrepris le développement des moteurs Mark-1 et Mark-2, en vue de leur utilisation dans les voitures automobiles. Ce moteur est basé sur un modèle à trois arbres combinant les fonctions d'énergie motrice et de transmission. La mise au point et les essais des éléments des moteurs se poursuivent encore présentement.

Pour le moment, le Japon ne semble pas donner une grande importance au développement des moteurs à turbine à gaz destinés aux véhicules à cause de problèmes concernant les matériaux et la technologie.

Moteurs fixes pour la production d'énergie

Seuls les États-Unis et le Japon semblent déployer une certaine activité dans ce domaine. Aux États-Unis, Westinghouse a entrepris des travaux d'approche au début des années soixante-dix, avec l'appui financier de DARPA. Les éléments céramiques furent mis à l'épreuve et ils semblent prometteurs. Cependant, les problèmes de régularité de fabrication et de coûts ont entraîné la mise au rancart de ce projet. Nombre d'autres études spécialisées dans le domaine militaire ont été exécutées, mais on ne dispose d'aucun détail sur le sujet.

Au Japon, on consacre beaucoup d'efforts à la mise au point des moteurs à turbine à gaz en vue de la génération d'énergie électrique. Le groupe Advanced Gas Turbines for Engineering Research Association (AGTERA) exécute l'étude technique, la mise au point et les essais nécessaires. L'AGTERA est un groupe composé d'entreprises privées et de laboratoires gouvernementaux. La compagnie Hitachi est responsable des turbines à pression basse et intermédiaire pendant que la société Mitsubishi effectue des recherches sur les turbines à haute pression. Toshiba est chargée de l'outillage de commande, alors que Kawasaki s'occupe des travaux sur la chambre de combustion en céramique. Ishkawajima est responsable du matériel de conditionnement et de transmission. La centrale pilote de 100 MW est située dans la ville de Sodegaura.

(ii) Moteurs Diesel

Bien que le moteur Diesel soit assez efficace, il n'en rejette pas moins la plus grande partie de son énergie sous forme de chaleur perdue dans les systèmes d'évacuation et de refroidissement. Pour obtenir un moteur Diesel plus efficace au point de vue énergétique, il est nécessaire de mieux employer la chaleur perdue. Les matériaux de néo-céramique offrent diverses possibilités qui n'existaient pas auparavant, surtout par l'élimination des systèmes de refroidissement. On trouvera ci-après, à la figure 16 une comparaison entre le bilan énergétique des moteurs Diesel de base à turbocompresseurs et turbo-coumpound et des moteurs Diesel adiabatiques, qui indique que les améliorations énergétiques sont très évidentes, passant de 35,6 % à 48 %.

TABLEAU 4

Orientation des programmes des fabricants de céramiques de la République fédérale d'Allemagne participant au programme national

Compagnie	Matériaux	Technologies de mise en forme	Éléments
Anawerk	RBSN HPSN SiSiC SSic	Coulage en barbotine Moulage par injection Matriçage à chaud	Stator Cône d'entrée Moyeux de rotor
Degussa	RBSN	Moulage par injection	Anneaux porte-aubes Aubes individuelles
ESK	HPSiC	Matriçage à chaud	Aubes, moyeux, Rotor
Feldmuhle	RBSN	Moulage par injection	Aubes, porte-aubes
Rosenthal	RBSN SiSiC	Lames minces Lamination Moulage par injection	Récupérateur Aubes Segment
Sigri	SiSiC	Moulage par injection Coulage en barbotine	Chambre de combustion Spirale d'entrée
H.C. Starck	SiC Si_3N_4	Poudre	

La mise au point de moteurs Diesel évolués comportant des éléments et des revêtements en céramique, particulièrement en nitrure de silicium et en zircone, se poursuit présentement aux États-Unis, en République fédérale d'Allemagne, en France, en Angleterre et au Japon.

Aux États-Unis, la compagnie Cummins Engine a entrepris la mise au point des moteurs Diesel adiabatiques turbo-compound grâce à l'aide financière de l'armée américaine. Elle a fait de grands progrès depuis le lancement du programme en 1976. Elle a réussi à démontrer la faisabilité technique du moteur en 1980 : un moteur de première génération installé sur un camion de 5 tonnes de l'armée américaine a donné d'excellents résultats et les essais sur route ont permis de constater une augmentation de 30 à 50 % de l'efficacité du combustible. Des travaux se poursuivent pour pousser la technologie encore plus loin. Plusieurs autres industries poursuivent des recherches analogues à cause des avantages commerciaux qu'elles pourraient en retirer, soit : International Harvester Co., Caterpillar Tractor Co., Hauge International Co., John Deer Co., et Terratek Inc.

C'est toutefois, et de beaucoup, au Japon qu'existe la plus grande activité industrielle, dans la mise au point des moteurs Diesel. Ceci ressort clairement du tableau 5 lequel énumère les compagnies impliquées ainsi que le type de travaux de recherche et développement présentement en cours dans ce domaine.

(iii) Moteurs à essence

On utilise déjà un grand nombre d'éléments céramiques dans les voitures dotées de moteurs à essence, comme le montre le tableau 6. A mesure qu'augmente l'utilisation des ordinateurs pour contrôler l'efficacité des moteurs et des émissions, le nombre des détecteurs céramiques utilisés devrait s'accroître considérablement au cours des années à venir.

En plus de leur utilisation comme détecteurs, il y a deux autres secteurs où l'on s'attend à ce que les néo-céramiques fassent une percée comme éléments structuraux à savoir les pièces d'usure et les turbocompresseurs.

Parmi les éléments qui peuvent améliorer particulièrement l'efficacité des moteurs, il y a, en tout premier lieu, les turbocompresseurs. Des travaux sont en cours pour développer les turbocompresseurs aux États-Unis, en République fédérale d'Allemagne et au Japon. Aux États-Unis, Ford Motor Company travaille activement à la mise au point de turbo-compresseurs à base de nitrure de silicium. On prétend que la compagnie possède la technologie nécessaire à leur fabrication, mais aucune décision n'a encore été prise au niveau de la commercialisation. La société Carborundum Co. étudie la fabrication de turbocompresseurs à base de carbure de silicium pour Volkswagen, en Allemagne et pour

d'autres utilisateurs possibles. En République fédérale d'Allemagne, Volkswagen poursuit activement un programme portant sur la mise au point et la commercialisation de turbocompresseurs aussi bien pour les voitures à moteurs Diesel que pour les voitures à essence. Elle a entrepris l'étude des éléments faits par un certain nombre de fabricants nationaux (SIGRI-SiC, ESK-Si_3N_4) et étrangers (Carborundum-SiC, NGK-Si_3N_4).

4.2.3 Perspectives futures

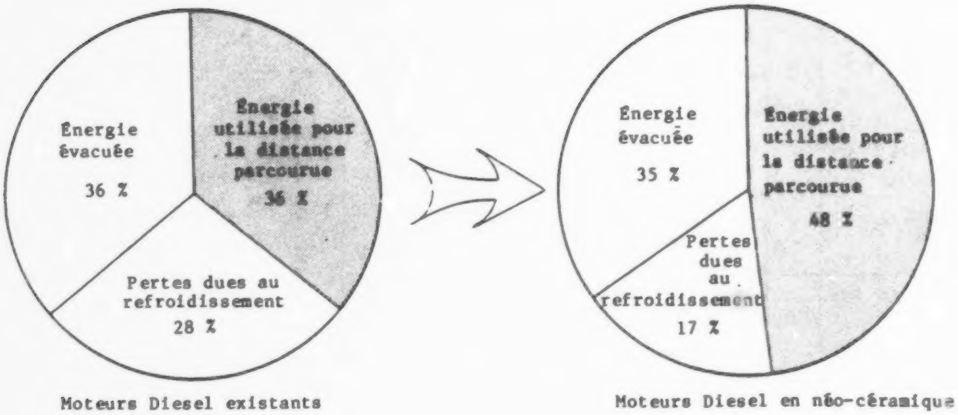
4.2.3.1 Problèmes technoloqiques

En dépit des efforts intensifs et des ressources énormes consacrés à la mise au point des néo-céramiques structurales pour les moteurs au cours des quinze dernières années et des réalisations techniques remarquables jusqu'ici, il reste encore un certain nombre d'obstacles technologiques importants à éliminer. Le succès futur de l'acceptation commerciale et de l'établissement des marchés dépend, en partie, de la découverte de solutions appropriées à ces problèmes.

Du point de vue de la mise au point des matériaux, trois obstacles majeurs existent. Tout d'abord la **possibilité de reproduire** fidèlement les éléments à l'étape de la fabrication. Par suite de la fragilité inhérente des matériaux céramiques, même les plus petites imperfections introduites au cours des étapes du traitement des matériaux et de la fabrication des éléments auront des effets nuisibles sur le rendement. On travaille actuellement à mettre au point la technologie nécessaire à la production d'éléments exempts de tout défaut par une meilleure connaissance scientifique des propriétés des poudres de départ, par de meilleures techniques, et, plus important encore, par une meilleure compréhension et un contrôle supérieur de la microstructure des éléments, ce qui se traduira ultérieurement par une plus grande maîtrise des propriétés et du comportement de ces éléments.

Deuxièmement, le **coût de fabrication** est trop élevé. Le coût total de fabrication comprend: le coût de la poudre, le coût du traitement et du façonnage des matériaux, le coût de la finition et, finalement, le coût de l'inspection et des essais. Tous ces coûts sont présentement élevés, certains plus que d'autres. Le tableau ci-dessous présente une ventilation de ces coûts :

Étape de fabrication	Coût relatif
Poudre	1
Traitement	2-3
Finition	7-10
Mise à l'essai	1-2



<u>FIGURE 16</u> : Amélioration de l'efficacité énergétique dans les moteurs Diesel avec l'utilisation des néo-céramiques.

TABLEAU 5

Orientation de la recherche des entreprises japonaises dans la mise au point de pièces de moteurs en néo-céramique

Exemple d'une compagnie \ Type de pièces		Moteurs à turbine à gaz	Chambre à combustion d'un moteur de type à échappement (Diesel)						Type de moteur à soupapes mobiles								Autres		
			Culasses	Axes de pistons	Têtes de pistons	Chemises de cylindres	Bougies chaudes	Autres	Sièges de culbuteurs (côté de la soupape)	Sièges de culbuteurs (côté de la tige de poussoir)	Guides de soupapes	Sièges de soupapes	Soupapes d'échappement	Poussoir	Cames	Autres	Bougies incandescentes	Segments de piston et segments d'usure	Autres
Fabricants d'automobiles et de pièces d'automobiles	Toyota	△	△	△	△	△	△		△	△		△	△	△	△	△	△	○	△
	Nissan	△	△	△	△	△	△	△	△	△		△	△	△	△	△	△		△
	Mazda		△	△	△	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△		△
	Honda																		
	Mitsubishi Motor	△			△	△	△	△	△	△	△		△		△		△		
	Suzuki						△						△						
	Fuji Heavy Industries								△	△	△			△	△	△			
	Daihatsu			△	△	△	△	△									△		
	Isuzu		△		△	△	○	△					△			△	○		△
	Hino		△		△	△		△	△	△			△	△	△	△	△		
	Nihon Piston Ring		△	△	△	△													
	Nippon Denso			△	△														△
	Izumi Motors				△														
Fabricants de céramiques, etc.	Kyocera	△	△	△	△	△	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△	○		△
	NGK Insulators	△	△	△	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△			
	NGK Spark Plug	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△			△
	Toshiba Ceramics	△		△	△	△		△	△	△	△	△	△		△	△			
	Hitachi Ltd.		△	△	△	△													
	Komatsu		△		△	△		△	△	△			△			△			
	Toshiba	△																	

Source : renseignements dans les journaux, etc.

Nota : en voie de recherche et de développement, déjà commercialisé.

Source: Long-Term Credit Bank of Japan, Ltd.

TABLEAU 6

Éléments céramiques utilisés dans les automobiles

Éléments	Matériaux
Céramiques fonctionnelles	
Détecteurs d'oxygène	ZrO_2
Détecteurs de détonation	PZT
Détecteurs de marche arrière	PZT
Ronfleur électrique	PZT
Thermo-détecteur pour l'eau	$Fe_3O_4 \cdot CoMn_2O_3NiO$
Thermo-détecteur pour l'échappement	$Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$
Résistance de la soufflante	$BaTiO_3$
Interrupteur de niveau de combustible	$Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$
Réchauffeur pour admission de gaz	$BaTiO_3$
Condensateur	$BaTiO_3$
Noyau du moteur	$Fe_2O_3 \cdot Mn_2O_3$
Isolant pour bougies	Al_2O_3
Substrat de microcircuits hybrides	Al_2O_3
Substrat du réchauffeur du volet de départ	Al_2O_3
Diode électroluminescente (LED)	Gap
EL	ZnS
Céramiques structurales	
Joint d'arrêt mécanique pour pompe à eau	Al_2O_3
Support à grains pour catalyseur	Al_2O_3
Support monolithe pour catalyseur	$MgO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$
Fibre pour piston FRM	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$
Isolant thermique pour catalyseur	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$
Bougie incandescente pour moteur Diesel*	Si_3N_4
Chambre de précombustion pour Diesel*	Si_3N_4
Pointe de culbuteur*	Si_3N_4
Turbocompresseurs*	

Source : U.S. National Academy of Sciences.

* Tous les éléments, sauf les quatre derniers, sont maintenant utilisés dans les automobiles de marque Toyota. Isuzu utilise la bougie incandescente et la chambre de précombustion. NGK fournit les pointes de culbuteurs pour utilisation dans les voitures-taxis. On en est à mettre au point les turbocompresseurs, et Kyocera ainsi que NGK en sont à l'étape de la production de prototypes au rythme d'environ 1 000 par mois.

Tous les membres de la communauté scientifique s'accordent à dire qu'il sera possible de réduire les coûts de traitement et de fabrication des matériaux par le choix et l'utilisation, dans des conditions optimales, de la technologie présentement disponible lorsqu'on aura mis en place des techniques de production en série. On s'attend aussi à ce que le coût de la poudre diminue, car le prix est déterminé par la demande totale pour toutes les applications, pour les moteurs comme pour les autres. Comme on prévoit que la fabrication des moteurs accaparera environ la moitié de la production totale, l'acceptation commerciale et la pénétration des éléments céramiques dans le marché des moteurs auront une influence marquée sur les prix définitifs. Les coûts de finition des éléments sont très élevés à cause de la nécessité de les polir au diamant, et il semble bien que ce soit le facteur individuel le plus important qui influe sur le coût final de fabrication. La solution à ce problème consiste à développer des techniques de traitement qui permettront d'obtenir des pièces façonnées de manière presque parfaitement précise et par la maîtrise des paramètres du traitement. Alors que cela semble être possible pour des formes simples, les formes complexes dans les moteurs constitueront encore un problème. En dépit des efforts intenses déployés par les fabricants de céramique pour résoudre ce problème constitue encore un défi technique, et le résultat final est loin d'être certain. Étant donné que les éléments céramiques destinés aux moteurs devraient théoriquement n'avoir aucun défaut, il est évident qu'il est essentiel de disposer d'excellentes techniques de mise à l'essai et d'évaluation. Jusqu'ici, on n'a pas trouvé de méthode satisfaisante autre qu'une inspection complète à 100 %. En outre pour certaines pièces complexes, il n'existe aucune technique sauf une mise à l'essai destructive.

Pour pouvoir les utiliser avantageusement dans les automobiles, il devra être possible de produire des moteurs céramiques en série, à bas prix. Au Japon, on estime présentement le coût global de fabrication pour les céramiques à environ 20 000 à 30 000 yens/kg (80 à 120 $ US/kg). On croit généralement qu'on ne pourra utiliser économiquement les céramiques dans les moteurs avant que le coût du produit fini ne soit réduit à moins de 5 000 yens/kg (20 $ US/kg). Les coûts actuels du nitrure de silicium (Si_3N_4) ordinaire et de pureté supérieure sont respectivement de 6 000 et de 22 000 yens/kg. Pour utilisation dans les moteurs, il est nécessaire de recourir au matériau de qualité supérieure ce qui porte présentement le coût de l'élément à environ 220 000 yens/kg (880 $ US/kg) si on adopte un coût de fabrication représentant 10 fois le coût de la matière première. D'après ce qui précède, il est évident qu'il existe un écart considérable entre le coût actuel et le coût que commanderait le marché. Le carbure de silicium, SiC, est beaucoup moins cher, soit environ 3 000 yens/kg pour la variété-alpha et 8 000 yens/kg pour la variété-bêta. Il présente donc des avantages certains au point de vue des coûts. Cependant, ses propriétés ne sont pas entièrement satisfaisantes. Il est probable qu'on utilisera ces deux produits et que le coût déterminera la proportion de chacun.

Le troisième obstacle est la fiabilité du service. Il y a des problèmes de fiabilité quand les probabilités de défaillance de service atteignent un niveau élevé jugé inacceptable. On admet aujourd'hui que la fiabilité constitue, après le coût, l'obstacle individuel le plus important quant à la commercialisation des types de moteurs utilisant les néo-céramiques, et que la certitude d'obtenir des niveaux de fiabilité se rapprochant de ceux des moteurs conventionnels constitue une condition essentielle de l'acceptation de ces nouveaux types de moteurs par l'usager et par conséquent de leur diffusion commerciale. Jusqu'ici, toutes les données qui existent sur la fiabilité, sauf quelques essais de démonstration sur route de certains véhicules, proviennent de mise à l'essai de prototypes sur banc d'essai. Il est donc évident qu'on est encore loin du moment où ces moteurs seront acceptés de façon courante.

Bien que de moindre importance, un certain nombre d'autres facteurs touchant à la technologie influenceront l'acceptation commerciale et la pénétration sur le marché des éléments céramiques dans les moteurs. Parmi ces facteurs, les plus importants sont les suivants :

- A cause des coûts d'investissement et des problèmes d'opportunisme, il est très probable que la conception des moteurs métalliques actuels ne changera pas, du moins pour quelque temps encore. Il faudra donc utiliser les éléments céramiques avec des métaux. Parmi les problèmes suscités par cet état de chose, il faut mentionner le manque de connaissance des propriétés des céramiques, surtout leur fragilité, parmi les ingénieurs de conception habitués à s'occuper de métaux; il existe aussi des problèmes de production rattachés eux aussi au manque de connaissance pratique des céramiques.

- Les problèmes associés à l'entretien et aux réparations au cours des premières années.

- L'acceptation par le public. Tout le monde sait que les céramiques sont fragiles et se brisent facilement. Il faudra par conséquent sensibiliser le public, au moins au cours des premières années.

4.2.3.2 Réaction de l'industrie automobile

Les motifs favorisant l'utilisation possible d'éléments céramiques dans les moteurs des automobiles étaient les suivants : gains dans l'efficacité énergétique se traduisant par des économies de combustible; réduction des émissions toxiques dans les gaz d'échappement permettant de se conformer aux exigences environnementales; possibilité de réduction ou même d'élimination de

la nécessité d'importer des matières premières essentielles. Toutes ces raisons existaient au cours des années soixante-dix et existent encore aujourd'hui. Par contre, le climat des affaires dans l'industrie automobile s'est transformé de façon dramatique; les besoins et les priorités se sont modifiés considérablement. Cette situation est particulièrement vraie aux États-Unis et au Japon.

Aux États-Unis, l'industrie automobile s'est restructurée après la récession de 1982, non seulement pour protéger son marché intérieur, mais aussi pour améliorer sa position concurrentielle à l'échelle internationale, surtout face au Japon. Les principaux buts poursuivis sont la réduction des coûts unitaires et l'amélioration du rendement. Pour atteindre ces buts on a posé un certain nombre de gestes pratiques : livraison des pièces au moment opportun pour réduire les coûts des inventaires; meilleure productivité en cours de fabrication grâce à l'utilisation de robots; améliorations de la conception des pièces et des systèmes. On a réussi à se conformer aux exigences ayant trait tant à l'efficacité énergétique qu'aux émissions toxiques. L'accroissement de l'efficacité thermique a été obtenu par la diminution de la taille des voitures, la substitution de certains matériaux pour en réduire le poids et la conception de carrosseries aérodynamiques. La réduction des émissions toxiques s'est faite par l'utilisation de catalyseurs et par la technologie des détecteurs pour améliorer l'efficacité de la combustion. De plus, l'importance relative de l'amélioration de l'efficacité des moteurs est soumise à d'autres impératifs par suite de la situation actuelle des prix mondiaux du pétrole et du fait que la crise de l'énergie qu'on prévovait ne s'est pas produite.

Les deux géants de l'industrie automobile américaine, Ford et GM, sont activement impliqués dans la mise au point de moteurs en néo-céramique et ont donc une expérience directe de l'état des progrès de la technologie; des problèmes technologiques et de coûts et de la période de temps requise pour trouver des solutions à ces problèmes; et, ce qui est plus important, du coût du passage de la génération présente des moteurs métalliques aux moteurs basés sur l'utilisation de la céramique. Selon quelques sources bien informées de l'industrie, les trois considérations les plus importants susceptibles d'influencer le résultat final sont les suivantes :

- la conception des moteurs est généralement décidée au moins cinq ans avant qu'on en entreprenne la production à cause du délai de démarrage requis;

- un modèle (une famille) de moteurs doit être utile pendant une période d'au moins 20 ans pour justifier les investissements requis;

° pour remplacer les métaux, toutes autres choses étant égales, le coût des éléments de céramique devra être bien inférieur ou l'efficacité énergétique supérieure d'au moins 10 %.

Ni Ford, ni GM ne semblent présentement s'être engagés à commercialiser ce genre de moteurs, ce qui indique qu'on est encore loin de l'apparition pratique des moteurs céramiques.

Une étude récente du ministère du Commerce des États-Unis prévoit les périodes de référence suivantes pour l'introduction commerciale des éléments de moteurs en néo-céramique :

Utilisation finale	1985	1990	1995	2000 ......
Pièces de moteurs choisies	-------	-------		
Petits moteurs fixes		--------------		
Moteurs pour véhicules			-------------	
Gros moteurs fixes			-------	------
Moteurs d'avions				---------

Le groupe Charles River Associates a dressé le schéma suivant décrivant les principales étapes de la mise au point des éléments céramiques destinés aux moteurs :

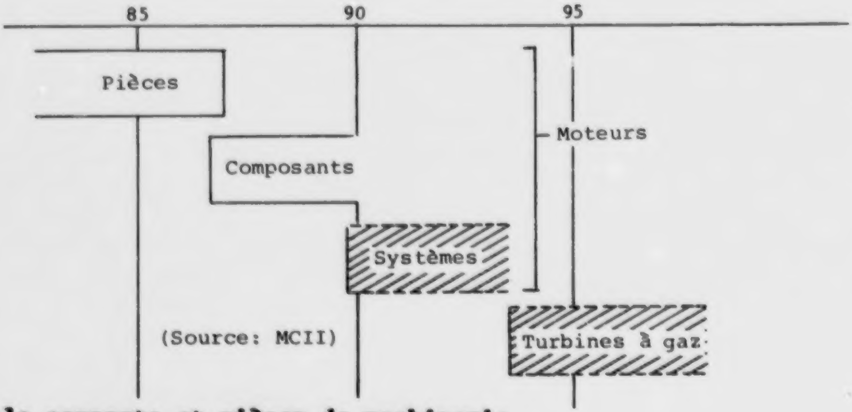
Jalon	Date prévue de l'introduction commerciale
Rotor de turbocompresseur	Milieu des années quatre-vingt
Diesel non refroidi	Fin des années quatre-vingt au début des années quatre-vingt-dix
Diesel adiabatique	Début à fin des années quatre-vingt-dix
Turbine à gaz	XXI^{e} siècle

De toutes les industries mondiales de l'automobile, l'industrie japonaise semble être la plus engagée dans la production, à long terme, des moteurs céramiques. Les compagnies d'automobiles et les fabricants d'éléments céramiques poursuivent des programmes conjoints visant à la commercialisation de l'utilisation d'éléments céramiques dans les moteurs. Voici quelques exemples de ces ententes commerciales :

Compagnies d'automobiles	Fabricants de céramiques
Isuzu Motors	Kyocera Corporation
Mitsubishi Motors	Asahi Glass
Toyota Motor Corp.	Toshiba Ceramics
Nissan Motors	Hitachi Chemicals
Komatsu	Toshiba Ceramics

Actuellement, quelques compagnies ont entrepris la production commerciale de certains éléments. Elles produisent des bougies à incandescence et des chambres à turbulence au nitrure de silicium pour les moteurs Diesel au rythme de 30 000 unités par mois alors qu'on fait la production d'environ 1 000 prototypes de turbo-compresseurs par mois.

Nonobstant ces quelques succès, l'industrie et la communauté technique sont conscientes des trois sérieux problèmes à résoudre, à savoir la possibilité de reproduction précise, la fiabilité de service et le coût. Des discussions récentes indiquent que les Japonais considèrent la mise au point du moteur céramique comme l'objectif final en plus d'un nombre restreint mais défini d'utilisations intérimaires qui pourront être commercialisées. Le groupe de travail en céramiques fines du MCII a préparé le scénario de développement suivant pour les éléments céramiques des moteurs d'automobiles.



4.3 Outils coupants et pièces de machinerie

4.3.1 Historique

On utilise des outils coupants depuis des temps immémoriaux pour enlever les excès de matériaux des produits pendant le processus de fabrication. Au cours des années, il s'est produit, dans la fabrication et l'utilisation des outils coupants, beaucoup de changements qui ont augmenté la productivité à l'étape de l'enlèvement des matériaux ou de la finition de la production. La mise au point de machines-outils améliorées pour retenir et guider l'outil coupant a accru la puissance,

la précision et la vitesse d'action dans les travaux d'enlèvement de matériaux excédentaires. L'introduction de machines-outils à commandes numériques et la nécessité d'améliorer la productivité ont exercé une énorme pression sur les fabricants d'outils coupants qui doivent mettre au point des produits meilleurs et plus efficaces.

En général, le coût de l'outil coupant lui-même n'est qu'une faible partie du coût global des travaux d'usinage. Le coût même de l'usinage des métaux dépend d'un certain nombre de facteurs différents. Les plus critiques de ces facteurs sont : la vitesse de coupe, la durée de vie de l'outil coupant, ainsi que la probabilité et le coût du mauvais fonctionnement en cours de marche. Par ailleurs, ces facteurs dépendent de la nature du matériaux de l'outil coupant et de ses propriétés; des propriétés des matériaux ou des pièces qu'on est en train d'usiner; des caractéristiques de la machine-outil qui retient ou guide l'outil coupant; et de la nature de la coupe elle-même.

4.3.2 Outils coupants en céramique

Les aciers à coupe rapide ont été remplacés par des outils de carbure de tungstène (WC) cémenté au cours des années trente, puis par le carbure de titanium (TiC). Parce que, dans les travaux de coupage, les matériaux durs servent à couper les matériaux moins durs et parce que les céramiques sont dures par elles-mêmes, on a mis au point en Allemagne des outils coupants fabriqués à base d'alumine (Al_2O_3) au cours de la Seconde Guerre mondiale; ces outils furent par la suite adoptés commercialement en Amérique du Nord au milieu des années cinquante.

Au tout début, la caractéristique principale des outils coupants en céramique a été l'incapacité permanente d'utiliser des outils de céramique convenant au travail à exécuter. On reconnaît maintenant qu'il est impossible qu'un seul et même outil coupant en céramique puisse remplacer soit les outils coupants au carbure cémenté ou les outils en métal; les propriétés de la céramique comme la résistance, la microstructure et la forme doivent être adaptées à la pièce à usiner. Dans la période de 1960 à 1970, une meilleure compréhension de ces facteurs a entraîné la fabrication d'outils coupants à base d'alumine de meilleure qualité; on a ajouté du titanium, du carbure de titanium et du carbure de tungstène pour accroître la résistance de l'alumine. Cette amélioration a été suivie par l'adoption de matériaux plus durs comme le diamant polycristallin (PCD) et le nitrure de bore cubique (CBN).

4.3.3 Avantages des outils coupants en néo-céramique

Bien que les outils coupants fabriqués à base d'alumine aient été utiles, ils n'étaient pas entièrement satisfaisants à cause de leur fragilité et de leur faible conductivité thermique. Grâce à la mise au point des matériaux à base de nitrure de silicium pour les moteurs et au fait qu'on a reconnu l'excellence de leurs caractéristiques de dureté,

de solidité, et de leurs propriétés mécaniques à des températures élevées, il est devenu possible d'utiliser ces matériaux pour la fabrication d'outils coupants; la pointe coupante peut travailler à des températures beaucoup plus élevées par rapport à l'alumine et aux autres matériaux plus anciens. La figure 17 présente les rapports qui existent entre l'accroissement de la vitesse de coupe et la substitution de différents matériaux pendant la période s'écoulant de 1800 à aujourd'hui. L'augmentation des vitesses de coupe, dans des conditions appropriées, permet d'exécuter les travaux plus économiquement et favorise l'utilisation accrue de l'automation pour améliorer la productivité. Les coûts prévus pour différents matériaux par rapport à la vitesse de coupe, sont indiqués à la figure 18.

4.3.4 Activités industrielles

Un certain nombre de compagnies aux États-Unis, en Suède, en République fédérale d'Allemagne, en Angleterre et au Japon fabriquent et commercialisent des outils coupants faits de néo-céramiques.

Aux États-Unis, la production nationale d'outils coupants en néo-céramique est entre les mains de six compagnies, à savoir : GTE Sylvania, GE Carboloy, Kennmetal, Greenleef, VR/Wesson et Kyocera. Kyocera, une filiale américaine de Kyoto Ceramics of Japan, est le plus important fabricant d'outils coupants aux États-Unis où le volume de ses ventes a atteint environ 1,5 million de dollars en 1983. Kyocera a accaparé une large part du marché américain en 1982 par suite de l'acquisition de la filiale américaine de la compagnie Feldmuhle de la République fédérale d'Allemagne. GTE Sylvania, après avoir acquis la compagnie Valeron, est probablement le deuxième plus important manufacturier avec des ventes de l'ordre d'un million de dollars en 1983. Greenleef, qui a récemment acquis la division Nucermet de B & W, devrait aussi avoir un chiffre de ventes d'environ un million de dollars. On estime que Kennmetal qui a une entente ayant trait à l'utilisation de la technologie du sialon avec Lucas Cookson d'Angleterre, produit pour environ 50 000 $ de produits. Les sociétés GE Carboloy et VR/Wesson ont encore tous deux très peu d'importance.

La moitié environ des outils coupants en néo-céramique vendus aux États-Unis en 1983 étaient fabriqués en grande partie ou entièrement au Japon. L'exportateur principal est NTK, une filiale de la compagnie NGK Spark Plug. Les produits sont finis dans une usine des États-Unis. On estime le total des ventes à environ 4 à 5 millions de dollars par an, représentant près de 40 à 50 % du total du marché américain. Les autres exportateurs importants sont Sumitomo et Nippon Products. Le tableau 7 présente une liste des principales compagnies qui fabriquent ou vendent des outils coupants aux États-Unis. La pénétration du marché total est de l'ordre de 1,5 %.

Quatre compagnies sont en grande partie responsables de la production japonaise d'outils coupants en céramique : NGK Spark Plug Co., Sumitomo Electric, Diejet Kogyo et Nippon Tungsten. On peut mentionner parmi les

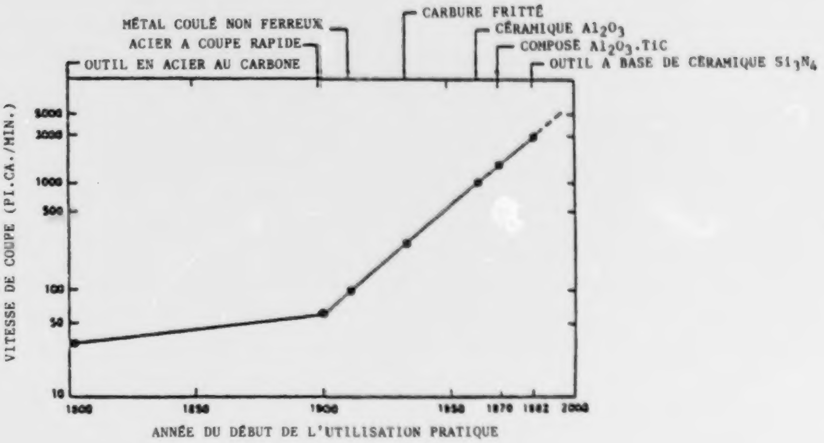
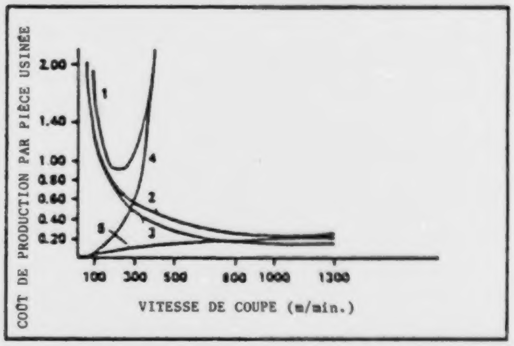


FIGURE 17 : Vitesse de coupe des outils en fonction de l'année du début de leur utilisation.
Source : Charles River Associates.



1 - Coût de production par pièce usinée en utilisant des carbures
2 - Coût de production par pièce usinée en utilisant des matériaux coupants en céramique
3 - Coût de la machine par heure, plus coût de la main-d'oeuvre, etc.
4 - Coût total par pièce usinée en utilisant des carbures
5 - Coût total par pièce usinée en utilisant des matériaux coupants en céramique

FIGURE 18 : Coûts de production résultant de l'utilisation de divers matériaux pour les outils coupants.
Source : Charles River Associates.

autres fournisseurs Mitsubishi Metals, Toshiba Tungaloy et Kyoto Ceramics. Les outils coupants en néo-céramique ont davantage pénétré le marché du Japon que celui des États-Unis et ils représentent à peu près 4 % du secteur des céramiques à base de carbure du marché japonais.

On considère que les Européens sont les plus grands utilisateurs d'outils coupants en céramique. On attribue cela au fait qu'il leur était difficile de se procurer du tungstène après la Seconde Guerre mondiale, ce qui les a poussés à adopter la technologie des outils coupants en céramique plus tôt et plus rapidement. Feldmuhle A.G., en Allemagne, est le plus gros producteur d'outils coupants en céramique destinés à l'Europe; son total des ventes pour 1982 est estimé à 12 millions de dollars. On s'attend aussi à l'arrivée prochaine dans ce marché de Krupp-Widia.

La compagnie Sandvik, de Suède, est aussi très active dans le marché des outils coupants. En plus des outils au carbure cémenté, elle fabrique des outils coupants de type sialon, en utilisant la technologie acquise de Lucas Cookson, d'Angleterre. Il n'a pas été possible d'obtenir la valeur de ventes de cette compagnie.

Au Canada, les deux principaux manufacturiers d'outils coupants sont Sandvik Canada Corporation de Mississauga (Ontario) et International Cutting Tools, de Montréal. La première de ces compagnies appartient à part entière à Sandvik, de Suède; elle fabrique des outils coupants au carbure pour utilisation dans l'industrie automobile à Windsor (Ontario), et pour utilisation dans les mines à Montréal (Québec) et pour d'autres fins.

4.4 Applications électroniques

4.4.1 Historique

L'utilisation des céramiques dans la fabrication des éléments électroniques est basée sur leurs propriétés électriques magnétiques et optiques. Le commerce des éléments électroniques est relativement bien établi et la production commerciale a été considérable depuis les années cinquante.

Du point de vue fonctionnel, on a identifié huit types différents de céramiques électroniques, comme l'indique la figure 19. Le tableau 8 indique les rapports existant entre le type, les propriétés, la composition et les applications des différentes céramiques.

La nature du marché des céramiques électroniques se modifie considérablement pour tenir compte des progrès et des changements technologiques dans l'industrie électronique. Tout d'abord, l'ancienne pratique d'éléments divers assemblés en un système pour répondre à des besoins particuliers est remplacée par des systèmes intégrés dans lesquels tous les éléments fonctionnels sont regroupés, c'est-à-dire, les microcircuits. Deuxièmement, la miniaturisation des systèmes et des appareils électroniques se poursuit à un rythme rapide pour plusieurs

TABLEAU 7

Principaux fournisseurs d'outils coupants en néo-céramique destinés au marché des États-Unis

Compagnies	Compositions	Procédés	Produits aux États-Unis	Produits à l'étranger
Nucermet	Al_2O_3 + TiC	Chaud	x	
	Al_2O_3	Froid	x	
Greenleef	Al_2O_3	Froid	x	
	Al_2O_3 + TiC	Chaud	x	
	à base de Si_3N_4		x	
Kennametals	à base de Si_3N_4	Froid	x	
	Al_2O_3	Froid		x
	Al_2O_3 + TiC	Chaud		x
Kyocera	Al_2O_3 + TiC	Chaud	x	
	Al_2O_3 + ZrO_2	Froid	x	
	Al_2O_3 + ZrO_2	Froid	x	
	Al_2O_3 + TiC	Chaud		x
NTK*	Al_2O_3	Froid		x
	Al_2O_3 + TiN	Froid		x
	Al_2O_3 + TiC	Chaud		x
Sumitomo	Al_2O_3	Froid		x
	Al_2O_3 + TiC	Chaud (HIP)		x
Valeron	Al_2O_3	Froid	x	
	Al_2O_3 + TiC	Chaud	x	
Iscar	à base de Si_3N_4		x	

Source : Charles River Associates, basé sur R.L. Hatschek, mai 1981, Take a New Look at Ceramics/Cermets, in American Machinist : 165-172; et divers contacts avec l'industrie.

* On pense que ces outils sont matricés au Japon mais meulés aux États-Unis.

raisons, principalement pour tenir compte des espaces restreints dans l'ensemble des circuits électroniques et pour augmenter les vitesses de communication.

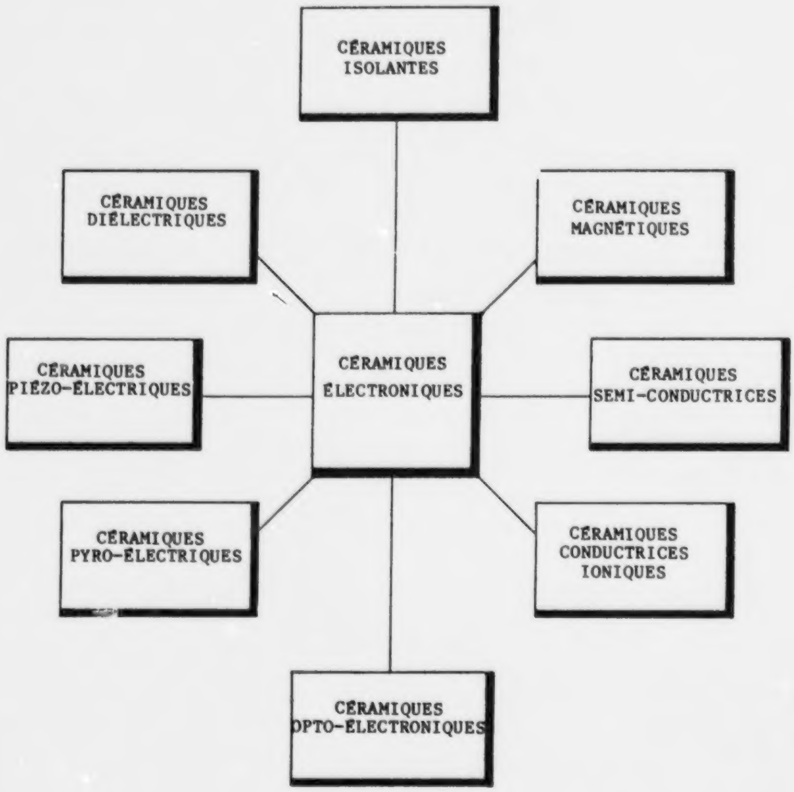
Il y a eu des progrès remarquables dans les technologies des matériaux et des procédés pour se conformer à ces modifications. Il reste encore, néanmoins, beaucoup de place pour des améliorations et on travaille activement à la réalisation des améliorations nécessaires, particulièrement aux États-Unis et au Japon.

4.4.2 État actuel et perspectives

On considère que le Japon est en tête mondialement en ce qui a trait aussi bien à la technologie des céramiques électroniques qu'à la fabrication des éléments et des microcircuits. Les circuits multicouches (MLC) viennent maintenant remplacer les anciens types de circuits et il existe une concurrence extrêmement forte autour de la mise au point de matériaux ayant les propriétés requises et de la technologie du traitement et de la fabrication. L'industrie américaine prend des mesures pour protéger sa part nationale du marché et, si possible,l'augmenter. La concurrence devrait susciter des recherches concernant l'utilisation des néo-céramiques dans la technologie des circuits multicouches dans trois directions fondamentales : diminution des coûts, amélioration de la fiabilité et compatibilité avec les générations prochaines de microcircuits.

On a déterminé que deux domaines d'application avaient le plus haut potentiel de marché : les microcircuits optiques et les détecteurs.

Les microcircuits optiques sont des ondes guidées optiques qui exécutent une diversité de fonctions de transformation sur les rayons lumineux qu'elles guident. La plus importante utilisation ultérieure des microcircuits optiques se fera dans les systèmes de communications par fibres optiques, y compris les télécommunications commerciales, les communications militaires, et les liaisons de transmission de données entre ordinateurs. Parmi les autres utilisations ultérieures potentielles, on peut mentionner la détection optique, le traitement des signaux optiques et la mécanographie optique. A court terme, on prévoit que ces dispositifs seront fabriqués à l'aide de matériaux céramiques monocristallins comme le niobate de lithium comme substrats à cause de leurs propriétés électro-optiques et de leur facilité de fabrication. On pourra ultérieurement préférer des matériaux semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium. Bien que ces dispositifs offrent des possibilités de rendement élevé et des avantages de coûts-bénéfices dans les systèmes de fibres optiques, il y a un certain nombre d'obstacles techniques à éliminer, avant qu'ils ne soient acceptés commercialement et que des occasions de marché avantageuses ne se présentent. Presque toutes les activités qui se poursuivent présentement dans ce domaine portent sur la recherche et le développement. Un certain nombre de pays sont actifs dans ce secteur, particulièrement les États-Unis, le Japon, la France et le Royaume-Uni. Les prévisions du marché pour les États-Unis seulement s'élèvent à 900 millions de dollars au cours des années quatre-vingt-dix.



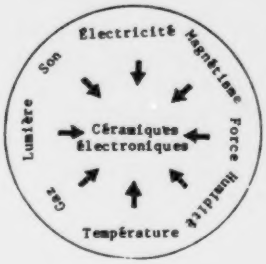
<u>FIGURE 19</u> : Types de céramiques électroniques.

TABLEAU 8

Applications des céramiques électroniques

Types	Propriétés	Matériaux	Applications
Céramiques isolantes	Non conductrices	Al_2O_3MgO, BeO	Substrats de microcircuits et de circuits multi-couches Substrats pour circuits hybrides Substrats pour condensateurs et résistances
Céramiques diélectriques	Chargement-stockage	$BaTiO_3$, $SrTiO_3$	Condensateurs céramiques, Filtres à micro-ondes, Filtreurs, capaciteurs d'appoint
Céramiques piézo-électriques	Interconversion d'énergie électrique-mécanique	PZT	Vibrateurs, oscillateurs, filtres, générateurs d'étincelles, technologie d'ondes acoustiques de surface
Céramiques magnétiques	Magnétiques	$MnZnFe_2O_4$ $Ba_6Fe_{12}O_{19}$	Têtes d'enregistrement magnétiques, détecteurs de température, aimants permanents, noyaux de TV, hauts-parleurs, périphériques d'ordinateurs, rubans magnétiques
Céramiques opto-électroniques	Électronique optique	Al_2O_3 PLZT, Y_2O_3	Lampes au sodium à haute tension, fenêtres optiques,
		$LiNbO_3$	matériaux laser, éléments de mémoire lumineux, affichage vidéo et stockage, obturateurs de lumière et soupapes, communications
Céramiques pyro-électriques	Sensibilité à l'infrarouge	SbSi + verre SbSi + Polymères	Détecteurs d'incendie et de fumée, détecteurs d'infrarouge Vidicons
Céramiques conductrices ioniques	Mobilité ionique	Bêta-Al_2O_3	Détecteurs, séparateurs d'accumulateurs
Céramiques semi-conductrices	Mobilité électronique	$BaTiO_3$, SiC ZnO, V_2O_5	Thermistor NTC : détecteur et compensateur de température, Thermistor PTC : élément de chauffage; régulateur de température, Thermistor CTR : élément détecteur de température, Thermistor à couche épaisse : détecteur d'infrarouge, Varistor : élimination du bruit

On prévoit aussi que les détecteurs céramiques constitueront un vaste marché dans les années à venir à cause de la grande diversité de leurs applications possibles; cette diversité vient du fait que les céramiques électroniques sont très sensibles et peuvent par conséquent détecter un certain nombre de signaux différents comme l'indique le tableau ci-après :



Les détecteurs céramiques servant à la détection des gaz combustibles semblent avoir un avenir particulièrement prometteur. Les États-Unis aussi bien que le Japon sont actifs dans ce secteur. Ces détecteurs sont basés sur des oxydes semi-conducteurs poreux comme les oxydes d'étain, de plomb et de zinc. La conductivité électrique de ces matériaux réagit à la présence et à la concentration de différents gaz. Les détecteurs de gaz sont ou seront utilisés dans un certain nombre d'applications aussi bien résidentielles qu'industrielles qui comprennent la surveillance et la maîtrise de l'environnement, le contrôle des procédés et la gestion de l'énergie. La surveillance des gaz toxiques et combustibles sert dans nombre d'industries, comme dans les installations de forage de gaz ou de pétrole, les raffineries de pétrole, les centrales électriques et les industries de transformation chimiques et pétrochimiques.

L'utilisation des dispositifs de surveillance des gaz est très courante dans l'industrie aux États-Unis où ils servent à la détection des gaz toxiques, mais on les utilise peu dans la détection des gaz combustibles. Au Japon toutefois, il semble, d'après ce qu'on rapporte, qu'on utilise beaucoup les détecteurs de gaz pour les gaz combustibles, en particulier comme dispositifs de contrôle des fuites de gaz dans les maisons. On a indiqué des taux de croissance de 40 à 60 %.

Tout indique qu'on réalisera au cours de la prochaine décennie un certain nombre d'applications potentielles importantes des détecteurs à gaz en céramique, dont la surveillance des fours, le contrôle du monoxyde de carbone, le contrôle des gaz d'échappement des automobiles autres que l'oxygène et la maîtrise des procédés. Advenant les progrès technologiques nécessaires et la diffusion commerciale de certaines de ces applications, on peut s'attendre à ce que la croissance des ventes dans cette industrie augmente de 40 à 50 % par année. A l'échelle du globe, les ventes pourraient atteindre de 260 à 450 millions de dollars.

4.5 Produits industriels

L'application industrielle des néo-céramiques devient rapidement un secteur de croissance important pour deux raisons. Tout d'abord, les fabricants de ces produits tentent de récupérer le coût de leur investissement en recherche et développement, au moins en partie. Certaines de ces compagnies ont investi des montants considérables au cours des 5 à 10 dernières années pour mettre au point les matériaux et la technologie de fabrication des éléments destinés aux moteurs de voitures automobiles. Cependant, pour des motifs que nous avons étudiés ailleurs dans le présent rapport, le marché de ces produits n'a pas progressé de la façon initialement prévue. C'est pourquoi, pour des raisons d'affaires, les fabricants recherchent activement des applications pour lesquelles il y a un marché immédiat.

Deuxièmement, et ceci est plus important encore, les néo-céramiques mises au point pour être utilisées dans les moteurs ont d'excellentes propriétés : elles ont une bonne résistance mécanique à des températures élevées ainsi que d'excellentes caractéristiques de résistance à l'érosion et à la corrosion et elles peuvent répondre aux besoins d'un certain nombre d'industries qui recherchent des matériaux ayant de meilleurs rendements pour s'adapter aux changements et aux améliorations technologiques; ce qui revient à dire que les besoins qu'a l'industrie de matériaux donnant de meilleurs rendements coïncident avec les besoins de l'industrie des néo-céramiques qui cherche à pénétrer des marchés immédiats.

On peut regrouper les applications industrielles en deux catégories, à savoir : les industries de fabrication et de machinerie, et les industries de transformation, surtout les industries de traitement de produits chimiques, du fer et de l'acier, de l'aluminium et des autres métaux non ferreux et des semi-conducteurs.

Le tableau 9 présente une liste de quelques exemples typiques d'utilisations industrielles des néo-céramiques.

4.6 Produits énergétiques et spatiaux

On tire profit des propriétés de résistance thermique, mécanique et chimique des néo-céramiques pour de nombreuses applications dans la génération et la conservation de l'énergie aussi bien que dans l'industrie aérospatiale, particulièrement, dans les véhicules spatiaux.

4.7 Produits de consommation

Les fabricants d'un certain nombre de produits de consommation, particulièrement au Japon, utilisent les néo-céramiques; les produits ainsi fabriqués comprennent par exemple des couteaux, des ciseaux, des éléments de rasoirs électriques, des bâtons de golf, des patins et des cannes à pêche. On prévoit que ce marché s'accroîtra considérablement dans un avenir rapproché.

TABLEAU 9

Produits industriels faits de néo-céramique

Utilisations en fabrication et en machinerie

- Segments de scellement mécanique
- Paliers
- Soupapes
- Éléments encastrés de filières pour extrudage ou étirage des fils métalliques
- Chemisage et soupapes pour pompes industrielles
- Éléments pour outillage de manutention mécanique
- Guides pour textiles

Industries de transformation

- Ventilateurs à gaz à haute température
- Tubes échangeurs de chaleur et tubes radiants
- Boutons enrayeurs pour fours de réchauffage de l'acier
- Ajutages de soudage et isolants
- Fonderies non ferreuses, particulièrement d'aluminium (gaines de thermocouples, tubes de masselottes, prises et bouchons de coulée de fours pour les creusets).
- Gabarits et accessoires de précision pour les procédés de soudage, de brasage et de traitement thermique
- Accessoires fixes résistant à l'usure pour le traitement électrochimique
- Outillage de fabrication chimique
- Pièces de brûleurs (charbon pulvérisé)
- Ajutages pour décapage au jet de sable
- Réchauffeurs de céramique
- Moules pour le recuit à haute température
- Creusets pour la fusion des alliages et des métaux corrosifs

5. POTENTIEL DU MARCHÉ ET CONCLUSION

5.1 Généralités

Bien qu'on ait clairement établi la nécessité des néo-céramiques pour un certain nombre d'applications ayant un grand marché potentiel et qu'on ait réalisé quelques succès dans la pénétration des marchés jusqu'à un certain point, il est difficile de prévoir de façon fiable le potentiel global à long terme du marché pour deux raisons. Tout d'abord, les technologies ne sont pas encore au point et il n'est pas clair encore qu'on ait trouvé réponse à un certain nombre de problèmes techniques compte tenu surtout du facteur temps. Dans certains cas ces obstacles sont assez sérieux pour retarder la commercialisation (les moteurs en sont un exemple); dans d'autres cas, la commercialisation des produits est déjà commencée, mais il y a des obstacles à la pénétration du marché (par exemple, les outils coupants). De plus la gravité des obstacles et le temps probable requis pour les éliminer sont trop importants pour les aires d'utilisation prévues.

Deuxièmement, la pénétration des marchés va au-delà des mérites des technologies concurrentielles, particulièrement du point de vue des coûts. Dans la majorité des cas, les néo-céramiques entreront en compétition avec des métaux et des technologies métalliques bien établies et la pénétration dépendra donc d'un équilibre entre le rendement et le coût. Ce sont finalement les tendances du marché qui détermineront les résultats.

On dispose, pour les États-Unis et le Japon, d'un certain nombre d'études dont on fera ici un bref examen.

5.2 Données sur le marché aux États-Unis

Kenney et Bowen ont été les premiers à reconnaître l'importance des données potentielles du marché, dans la création de l'intérêt pour les néo-céramiques et, ce qui est plus important, à attirer l'attention sur les perspectives internationales relativement aux ouvertures et à la concurrence. Leur étude fait la revue du marché des néo-céramiques au Japon et le compare au marché mondial. Les données pour le Japon proviennent du rapport Yano alors que celles pour les États-Unis et l'Europe sont le résultat de recherches et de discussions personnelles avec les représentants de l'industrie. Le tableau 10 présente une comparaison du marché des néo-céramiques pour le Japon et le monde entier compilée par Kenney et Bowen. En 1980, les néo-céramiques représentaient un marché mondial total de 4,25 milliards de dollars U.S. et près de la moitié de cette demande était accaparée par les compagnies japonaises. Il est aussi important de reconnaître le fait que les céramiques électroniques absorbent la plus grosse partie de ce montant : 88 % pour les céramiques électroniques comparativement à 12 % seulement pour les céramiques structurales. Ceci indique que les raisons de la croissance des néo-céramiques étaient reliées aux besoins des industries électroniques et des autres industries de technologie de pointe. Depuis

ce temps, on s'est rendu compte de l'énorme importance du marché des néo-céramiques structurales pour les moteurs et d'autres applications. Les données sur le marché mondial présentées dans le tableau 11 sont attribuables à Bowen. Les détails de la base des données qui a permis d'arriver à ces chiffres ne sont pas disponibles.

Il existe un écart considérable entre les données de Bowen et les autres sources pour les États-Unis comme pour les marchés mondiaux. Une des raisons probables de cet écart est la méthode utilisée, à savoir si les données sont basées sur les néo-céramiques " brutes " ou si elles sont fondées sur les néo-céramiques " finies ". Par exemple, dans le cas des circuits hybrides, on peut utiliser deux valeurs : la valeur du matériau de support et des autres matériaux céramiques utilisés pour la fabrication des circuits hybrides qui sera bien inférieure à la valeur de l'unité finie qui comprend en plus les coûts du traitement et des essais.

Tout récemment, Shroff de SRI International a fait une étude détaillée du potentiel du marché, de l'état de la technologie et de la période de temps prévue pour la pénétration des néo-céramiques structurales dans le marché, et il conclut ce qui suit : " Nous reconnaissons que les perspectives à long terme pour les néo-céramiques sont excitantes; nous nous demandons seulement quand se fera leur commercialisation ". SRI prévoit, pour 1995, un marché mondial d'environ 1 milliard de dollars US pour les matériaux de céramique structurale.

Johnson **et al.**, des laboratoires Argonne National ont fait, sous l'égide du ministère de l'Énergie, une analyse et une évaluation détaillées des implications économiques de l'industrie des céramiques structurales aux États-Unis. On a déterminé le potentiel du marché en estimant les ventes de 1981 des pièces faites de matériaux conventionnels qui pourraient être remplacées par des pièces céramiques. La plupart des données sur la valeur des livraisons proviennent du recensement de 1977 des fabricants (Census of Manufacturers) publié en 1980. On a fait une projection des ventes jusqu'en 2005 à l'aide des taux de croissance des industries provenant du scénario DRI TRENDLONG-20007B. On a ensuite calculé le potentiel du marché pour les années 1981, 1990 et 2000, par applications spécifiques et ce sont ces données que présente le tableau 12. On a ainsi prévu une augmentation du potentiel du marché de 4,3 milliards de dollars US en 1981 à 10,9 milliards de dollars d'ici l'an 2000, ce qui correspond à un taux de croissance annuel moyen de 6 % pour la décennie s'étendant de 1981 à 1990 et de 4,2 % pour la décennie suivante, de 1990 à l'an 2000.

Quand on évalue la pénétration du marché de toute technologie nouvelle, il faut tenir compte des aspects concurrentiels de la technologie, ce qui veut dire que la nouvelle technologie doit être économiquement compétitive si elle veut obtenir une part du marché des autres technologies. Comme on ne disposait pas de données sur ce sujet, on a utilisé la méthodologie de l'enquête analytique pour estimer la pénétration du marché. Des sources industrielles ont fourni les données

TABLEAU 10

Comparaison entre les marchés de néo-céramiques, 1980
(en millions de dollars)

Produits	Japon+	Marché mondial
Poudres céramiques	130	250
Ensembles-substrats de microcircuits électroniques	540	880
Condensateurs	325	750
Piézo-électriques	295	325
Thermistances-varistances	125	200
Ferrites	380	480
Détecteurs de gaz ou d'humidité	5	45
Céramiques translucides	20	45
Outils coupants :		
carbure, cermet,	120	1 000
non-carbure enrobé*	5	25
Céramiques structurales (résistant à la chaleur et à l'usure)	120	250
Total	2 065	4 250

*Par exemple : l'alumine, la zircone partiellement stabilisée, le carbure et le nitrure de silicium et les oxynures.

+Renvoi, n° 1
Source : Kenney et Bowen.

TABLEAU 11

Prévision du marché mondial des néo-céramiques
(en millions de dollars)

	1980	1990	1995
Japon	1 900	6 500	9 000
États-Unis	1 500	5 000	7 000
Autres	700	500	1 000
Total pour le monde libre	4 100	12 000	17 000

Source : H.K. Bowen.

de pénétration du marché prévues pour diverses applications d'ici l'an 2000 dans diverses conditions. La plupart des experts industriels sont d'avis qu'il ne serait possible de capturer qu'une très petite fraction du potentiel de marché à moins que le gouvernement ne fournisse une aide considérable à la recherche fondamentale nécessaire pour venir à bout des obstacles technologiques.

Le tableau 13 présente les estimations de pénétration du marché qu'on a ainsi établies. Pour les faibles valeurs, on suppose que le gouvernement ne financera que très peu, sinon pas du tout les recherches sur les céramiques et on ne prévoit qu'une pénétration de 5 % du marché total pour les diverses applications. Les secteurs industriels croient toutefois que des efforts sérieux stimulés par le financement de la recherche sur la céramique par le gouvernement peut amener la commercialisation des néo-céramiques vers la fin des années quatre-vingt et au cours de la décennie suivante. En vertu de ce scénario de forte pénétration, la pénétration du marché serait de 20 à 30 % pour la plupart des applications d'ici l'an 2000 et jusqu'à 75 % dans le cas des turbocompresseurs.

La figure 20 présente les rapports entre la pénétration du marché et le potentiel du marché pour ces cas de faible activité et d'activité élevée. On a adopté, comme hypothèse, que la pénétration du marché des céramiques commencerait en 1985 pour les moteurs Diesel de plus de 200 CV (moteurs fixes et de camions), les paliers et les turbocompresseurs. Plus tard, quand les néo-céramiques auront fait leurs preuves dans le commerce, elles commenceront vers 1990 à envahir le marché plus complexe des petits moteurs Diesel (moins de 200 CV), des moteurs Diesel adiabatiques, des moteurs Diesel-turbines à gaz pour voitures automobiles et des moteurs fixes à turbine à gaz.

En vertu du scénario de faible activité, on estime que la pénétration totale du marché approchera 545 millions de dollars US (1981) d'ici l'an 2000. Pour le scénario de forte activité, la pénétration serait d'environ 3 milliards de dollars US.

L'étude du ministère du Commerce des États-Unis intitulée A competitive Assessment of the US Advanced Ceramics Industry, publiée en mars 1984, fournit les prévisions les plus actuelles, et peut-être les plus fiables pour le marché des États-Unis. Le tableau 14 présente les livraisons de néo-céramiques prévues par types d'utilisation jusqu'à l'an 2000. On prévoit que les céramiques électroniques passeront de 534 millions de dollars US en 1980, à 3 485 millions de dollars en 2000 : les outils coupants de 45 à 960 millions de dollars; les pièces de moteurs de zéro en 1980 à 840 millions; et les pièces d'usure de 20 à 540 millions de dollars US.

TABLEAU 12

Sommaire du potentiel du marché américain pour certaines pièces de céramique choisies

Applications	Potentiel du marché en millions de dollars US (1981)			
	1977	1981	1990	2000
Éléments de moteurs Diesel ou à turbine à gaz pour véhicules routiers				
Pistons, segments de piston et soupapes :	595	709	1 199	1 807
Chemises de cylindre et éléments encastrés de tête de cylindre	653	778	1 316	1 984
Paliers				
Coussinets à galets coniques, à galets non coniques, paliers montés, galets et pièces de rechange	2 099	2 502	4 232	6 379
Turbocompresseurs	101	120	203	306
Turbines à gaz, sauf pour les avions	148	176	298	449
Total pour toutes les applications	3 596	4 285	7 248	10 925

TABLEAU 13

Variation de la pénétration du marché américain par les éléments de céramique d'ici l'an 2000 (en millions de dollars, 1981)

Applications	Potentiel du marché	Pénétration du marché %		Pénétration du marché	
		Faible	Élevée	Faible	Élevée
Éléments de Diesel ou turbines à gaz					
Pistons, segments de piston et soupapes[a]	1 807	0,05	0,20	90	361
Chemises de cylindres, éléments encastrés de tête de cylindre[a]	1 984	0,05	0,20	99	397
Paliers	6 379	0,05	0,30	319	1 913
Turbocompresseurs	306	0,05	0,75	15	230
Turbines à gaz, sauf pour les avions	449	0,05	0,30	22	135
Total	10 925			545	3 036

[a] Y compris les pièces des moteurs Diesel ou à essence pour toutes les applications.

Source : L.R. Johnson **et al.**

5.3 Données sur le marché pour le Japon

Les données sur le marché pour le Japon proviennent d'un certain nombre de sources énumérées ci-après :

- L'institut de recherches Yano
- Le ministère du Commerce international et de l'Industrie (MCII)
- La banque Long-Term Credit Bank of Japan Ltd.
- La banque Mitsubishi
- La société Toshiba
- L'association nationale de recherche économiques
- Les données de l'institut de recherches Yano

L'institut de recherches Yano a publié, en août 1982, un rapport intitulé " Marché des néo-céramiques au Japon ", rapport qui présente une vue d'ensemble de l'industrie japonaise des néo-céramiques et englobe 48 compagnies lancées dans la production et la recherche des néo-céramiques. Dans un rapport plus récent, ce nombre a été porté à 89 compagnies, conformément à la classification adoptée par le MCII pour les céramiques fines. Le tableau 15 présente une comparaison entre les données sur l'importance du marché des néo-céramiques pour 1980 et 1982, alors que le tableau 16 présente ces données pour 1983.

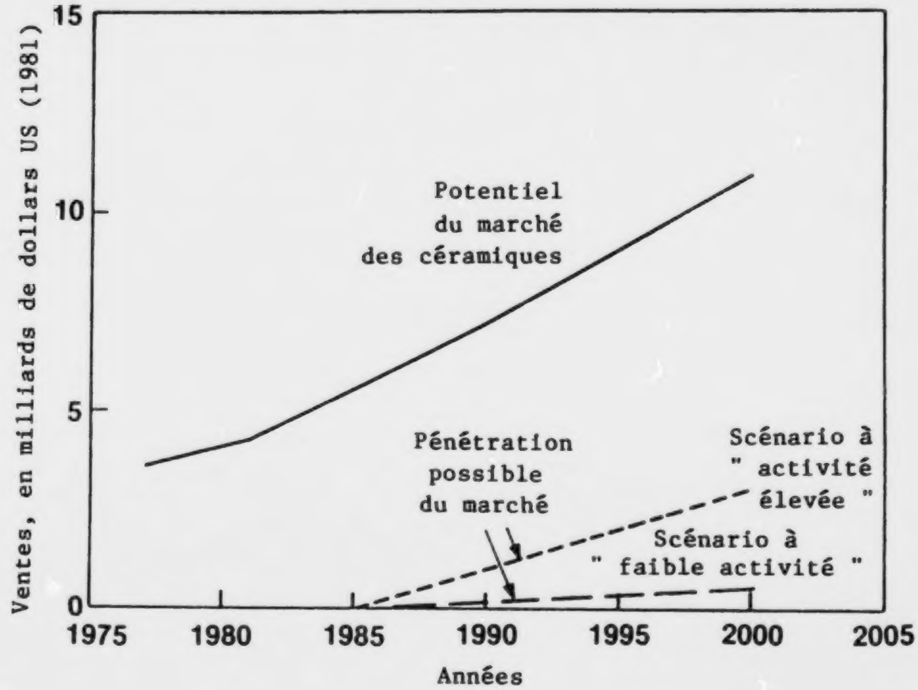
Le groupe de travail des céramiques fines (un comité consultatif du bureau de l'industrie des biens de consommation, MCII) a publié en mai un rapport établissant certaines prévisions pour le marché des néo-céramiques au Japon. Le rapport présente les estimations suivantes :

	Marché estimé	
Année	Yens (trillions)	$US (milliards)
1988	1	4
1990	1,3 à 1,8	5,2 à 7,2
2000	2,8 à 4,2	11,2 à 16,8

(Taux de change : 1 dollar US = 250 yens)

Les fonctionnaires du MCII ont indiqué qu'environ 75 à 80 % du marché ci-dessus pour les néo-céramiques était basé sur les besoins du marché en céramiques fonctionnelles, ce qui ne laisse qu'environ 20 à 25 % pour le marché en céramiques structurales; on peut donc en tirer la répartition suivante :

Année	Céramiques fonctionnelles	Céramiques structurales
	(en milliards de dollars US)	
1988	3	1
1990	3,9 à 5,4	1,3 à 1,8
2000	8,4 à 12,6	2,8 à 4,2



<u>FIGURE 20</u> : **Pénétration du marché par les utilisations des néo-céramiques en vertu de divers scénarios. Source: L.R. Johnson et al.**

TABLEAU 14

Livraisons américaines de néo-céramiques par types d'utilisation d'ici l'an 2000 (en millions de dollars 1980)

Type d'utilisation	1980	%	1990	%	2000	%
Électronique	534	88,0	1 900	75	3 485	59
Outils coupants	45	7,5	380	15	960	16
Pièces d'usure	20	3,0	180	7	540	9
Moteurs thermiques	0	0,0	56	2	840	15
Autres	2	0,5	15	1	70	1
Total	601	100,0	2 531	100	5 895	100

Source : Division de l'analyse industrielle, ministère du Commerce des États-Unis.

TABLEAU 15

Importance du marché des céramiques fines au Japon en 1980 et en 1982

Domaines et produits	Marché 1980	Milliards de yens (en millions de dollars, 1982)	Différence entre 1980 et 1982
Électronique			
Supports de microcircuits	68 (272)	86 (344)	aucune
Substrats céramiques	40 (160)	7,5 (30)	total des marchandises fabriquées en 1980, mais alumine seulement en 1982
Condensateurs	72 (288)	92 (368)	aucune
Piézo-électriques	65 (260)	38 (152)	pas de résonateurs au quartz en 1982
Thermistances et Varistances	27 (108)	24 (96)	aucune
Détecteurs de gaz	1 (4)	5,3 (21,2)	pas de détecteurs d'humidité en 1980
Ferrites	85 (340)	97 (388)	aucune
Céramiques translucides	4 (16)	2,5 (10)	silice et saphir en 1980, mais seulement l'alumine en 1982
Éléments chauffants	2 (8)	3 (12)	aucune
Machinerie industrielle seulement			
Outils coupants	12 (48)	14,7 (58,8)	aucune
Matériaux résistants à l'usure et au frottement	7 (28)	19,6 (78,4)	SiC Si_3N_4, ZrO_2, BN, stéatite
Matériaux résistants à la chaleur	9 (36)		en 1980, mais alumine seulement en 1982
Porteurs de catalyseurs pour automobiles	9 (32)	10 (40)	aucune
Autres			
Racines de dents artificielles		1,3 (5,2)	aucune
Os artificiels			aucune
Bijouterie		9 (36)	aucune
Total		400 (1600)	409,9 (1639)

Source : American Ceramics Society.

TABLEAU 16

Données prévues sur le marché des céramiques fines pour 1983
(en millions de yens)

Produits	Ventes de 1982	Augmentation en 1981	Ventes de 1983	Augmentation en 1982
Supports de micro-circuits	85 500	+25,7 %	101 800	+19,1 %
Substrats céramiques	4 570	+1,8 %	5 000	+9,4 %
Condensateurs	89 280	+10,8 %	107 060	+19,9 %
Piézo-électriques	30 822	+6,0 %	45 690	+9,8 %
Thermistances	15 849	+13,0 %	19 318	+21,0 %
Varistances	7 726	+5,0 %	9 350	+21,0 %
Détecteurs (ZrO_2) automobiles industriel	4 646	+38,0 %	5 690	+22,0 %
Ferrites				
tendres	59 594	-6,0 %	69 500	+16,0 %
dures	36 999	-6,0 %	43 300	+17,0 %
Outils coupants				
céramique	1 072	-18,7 %		
cermet	4 412	+17,4 %		
revêtement de céramique	8 294	-7,4 %		
Alumine résistante à l'usure	19 568	+17,0 %	20 214	+3,0 %
Céramique en nid d'abeilles	9 300	+30,0 %	10 700	9,0 %
Biocéramiques	1 780	+132,0 %	2 700	+51,0 %
Total	318 372		440 452	+38,3 %

Source : American Ceramics Society.

Les fonctionnaires du MCII ont aussi déclaré que les estimations projetées pour 1985 suivent la courbe supérieure voir figure 21 ce qui permet de penser que la taille du marché en l'an 2000 sera beaucoup plus près de 16,8 milliards de dollars US que de la valeur inférieure soit 11,2 milliards de dollars US.

Une comparaison entre les estimations du marché selon diverses sources et qui apparaissent au tableau 17 indique que les projections sont généralement conformes aux faits, compte tenu de la période de référence et des incertitudes techniques.

Si on ne regarde que le marché des néo-céramiques structurales, on constate que, jusgu'à ce jour, la plus grande part du marché concerne les outils coupants, les pièces d'usure et les supports de catalyseurs pour les automobiles et, qu'en 1982, la valeur du marché pour ces trois types de produits était respectivement de 58,8, 78,4 et 40 millions de dollars (voir tableau 16) ce qui représente un total d'environ 177 millions de dollars. Selon les prévisions du MCII, les néo-céramiques structurales doivent passer d'environ 200 millions de dollars US en 1982, à 1 milliard en 1988, soit cinq fois plus. Étant donné les problèmes technologiques, les coûts de la fabrication et la pénétration du marché, cette estimation semble être trop optimiste.

Une autre difficulté dans la répartition des données sur le marché japonais consiste à faire la part entre la consommation nationale au Japon et les exportations. Les fonctionnaires du MCII indiquent que les chiffres sont basés sur le total des ventes japonaises. Étant donné que ces ventes comprennent aussi bien la consommation nationale que les exportations, il est important de se rappeler qu'environ 50 % des marchés mondiaux étaient approvisionnés par le Japon en 1980 et que ce pays entend bien s'attribuer la même part des marchés à l'avenir. Si on accepte cette idée, la projection de 1,2 à 1,8 milliard de dollars US semble être réaliste.

5.4 Conclusion

En règle générale, il semble y avoir peu d'incertitude dans les prévisions des marchés pour les céramiques fonctionnelles, à savoir, les céramiques électroniques, les biocéramiques, etc. Dans le cas des céramiques structurales, particulièrement pour les moteurs thermiques, on devrait considérer les données sur les marchés comme des prévisions optimistes. Certains experts scientifiques et techniques croient que les problèmes technologiques et leur impact sur les prévisions des marchés semblent être vus de façon trop optimiste, compte tenu de la gravité des problèmes impliqués. Il semble que le " moteur céramique " est un " mirage " qu'on pourra ou qu'on ne pourra pas atteindre. On peut être sûr, toutefois, que des pièces et des éléments de céramique seront utilisés dans les moteurs à un rythme de plus en plus rapide. La figure 22 présente la période de temps prévue pour l'introduction des céramiques structurales dans divers types de marchés. Certaines sources autorisées croient qu'il faudrait ré-évaluer tous les ans les données sur les prévisions des marchés à la lumière des progrès techniques réalisés et qu'ainsi il serait possible d'ici 1990 de voir se dégager une image plus réaliste et plus fiable.

TABLEAU 17

Prévisions de l'importance du marché des céramiques fines au Japon

Organisation / Application		1981	1990				Début des années 2000
		*1 Relevé du MCII	*2 Prévision de la banque Mitsubishi	*3 Prévision de l'Association nationale de recherches économiques	*4 Prévision Toshiba	Prévision LTCB	*5 Prévision MCII
Pièces électriques et électroniques		189,8	535,0	669,5 à 799,6	644 à 759	540 ou plus	
Pièces mécaniques		40,8	143,0	279,4 à 979,4	266,8 à 920	210	2 800 à 4 200
Machinerie de transport (automobiles)	Moteurs (porteurs de catalyseurs non-gazeux)	3,5	500			280 à 420	
	(bougies)	37,0	52			52	
Énergie nucléaire		25,0	70	339 à 469		59 à 88	*6
Matériaux réfractaires		-	60		322 à 448,5	-	
Biochimique		1		-	920 ou plus	100 à	
Total		Environ 300	1 360,0	1 287,4 à 2 248	2152,8 à 3047,5	1 241 à 1 410	

Nota : *1 Données sur les céramiques fines, Bureau des céramiques fines du MCII, novembre 1982.

*2 Tiré du rapport mensuel d'enquête n° 338 de la banque Mitsubishi, juin 1983, page 25, tableau 5, cas (2).

*3 Tiré de Industry Trends, Association nationale de recherches économiques, février 1983, tableau 3, page 34.

*4 Ceramic Industry, vol. 121, n° 6, décembre 1983 (valeurs transformées au taux de 1 $ = 230 yens).

*5 Rapport de la conférence sur les problèmes fondamentaux des céramiques fines, Conférence sur les problèmes fondamentaux des céramiques fines.

*6 Mais, compte tenu du taux de croissance élevé des pièces et des effets de l'expansion de la technologie, la limite supérieure de la taille prévue du marché est de 5 trillions de yens.

Source : Long-Term Credit Bank Ltd. of Japan.

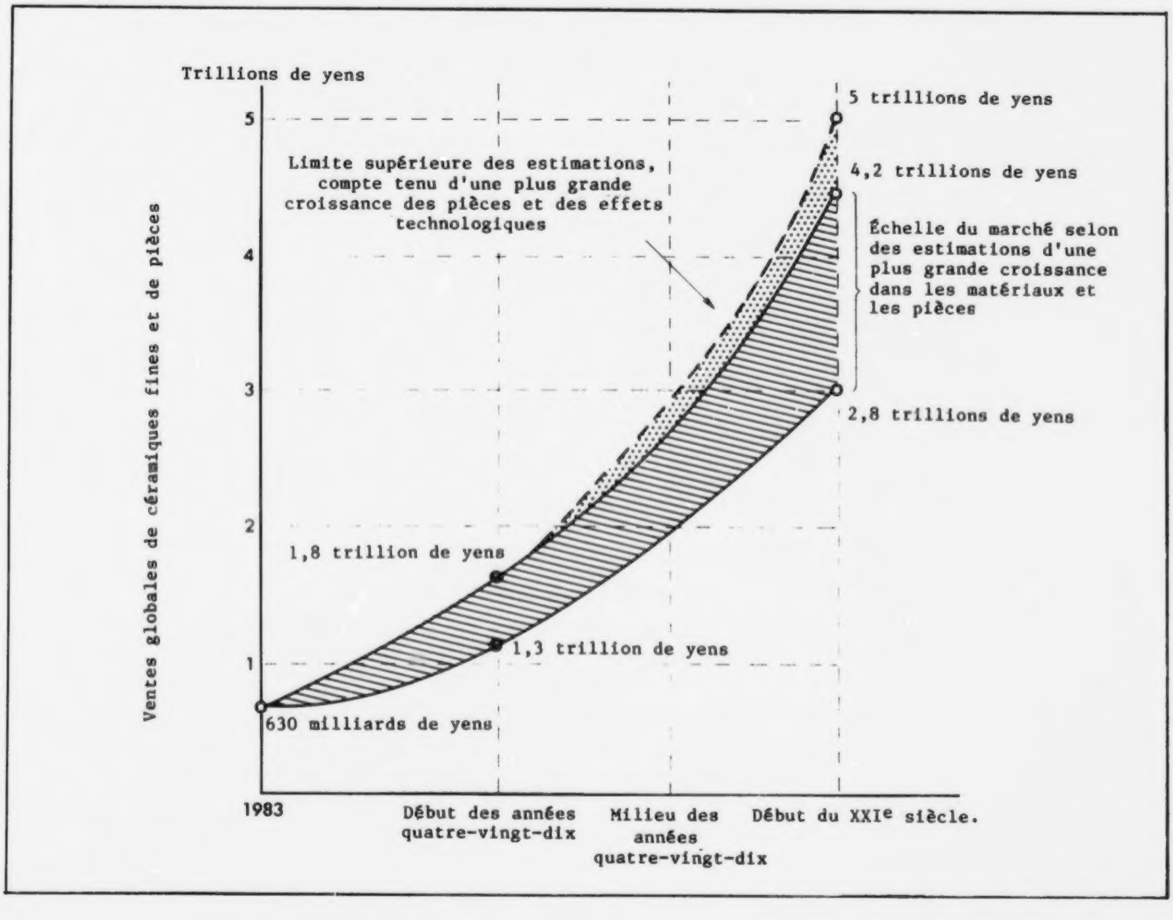
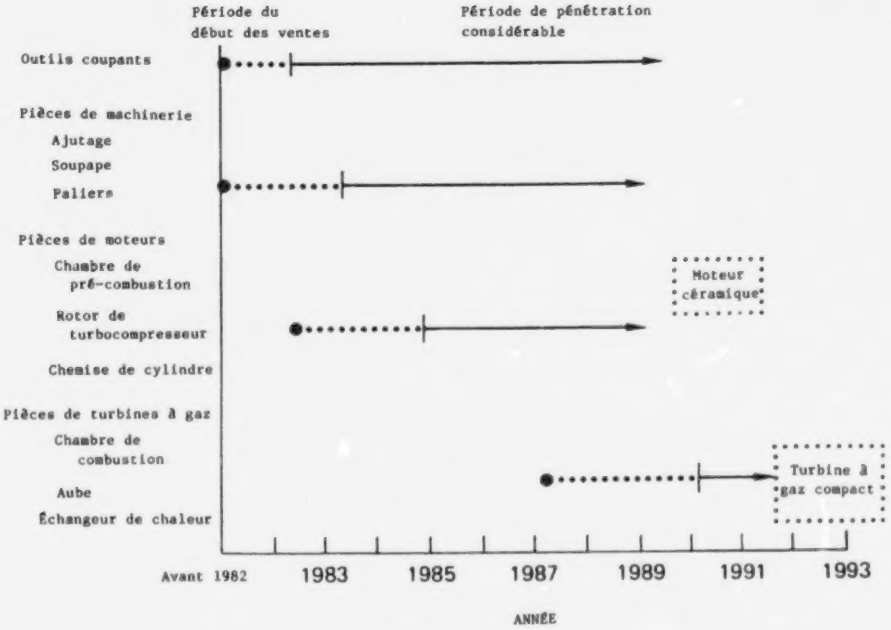


FIGURE 21 : Données du MCII sur le marché prévu pour les néo-céramiques au Japon.



<u>FIGURE 22</u> : Période de temps prévue pour l'introduction des éléments de néo-céramiques structurales.
Source: U.S. National Academy of Sciences.

6. PERSPECTIVES INTERNATIONALES

6.1 Généralités

A cause du potentiel du marché considérable, qu'on estime à environ 30 milliards de dollars d'ici 2010, et des avantages socio-économiques résultant d'une productivité et d'économies de coût d'énergie supérieures qui devraient être deux fois plus élevées, il y a une concurrence internationale intense qui se joue sur la mise au point de la technologie des néo-céramiques et de sa diffusion sur le marché. Le plus gros du marché et des avantages indirects sont attribués au secteur des céramiques " structurales " des néo-céramiques. On a établi, partout dans le monde, des programmes de recherche, de développement et de commercialisation intenses dans ce secteur des néo-céramiques. Étant donné que les programmes de recherche et de développement sont de nature générique et traitent du contrôle microstructural des propriétés et de la mise au point des procédés, on s'attend à ce que les résultats aient un impact dans le domaine complet des néo-céramiques et de leurs diverses applications.

Les pays suivants sont à l'avant-garde de la recherche, du développement et de la commercialisation à cause des initiatives conjointes du gouvernement et de l'industrie :

- les États-Unis;
- le Japon;
- la République fédérale d'Allemagne;
- la Suède.

La figure 23 présente le niveau relatif des efforts déployés en Angleterre, aux États-Unis, en République fédérale d'Allemagne et au Japon, durant la période de 1960 à 1985.

Le tableau 18, pour sa part, établit une comparaison entre les efforts internationaux actuels de recherche et de développement dans le domaine des néo-céramiques, par secteur d'application.

Il s'est fait des études poussées sur les néo-céramiques structurales surtout aux États-Unis, depuis le début des années soixante-dix, puis en République fédérale d'Allemagne et en Suède. Le Japon a commencé tard à entreprendre des travaux de recherche et de développement sur les céramiques structurales et n'a pas amorcé d'études avant 1978, à peu près. Cependant, les Japonais ont pris la tête du peloton, à l'échelle mondiale, parce que leurs matériaux sont de qualité supérieure et que leur technologie de traitement est beaucoup plus près de la production que dans les autres pays. Ils disposent aussi d'un certain nombre de moteurs faits d'éléments céramiques qu'ils utilisent pour obtenir l'expérience voulue en vue de leur commercialisation future. Les Japonais sont, semble-t-il, disposés à investir davantage et à attendre

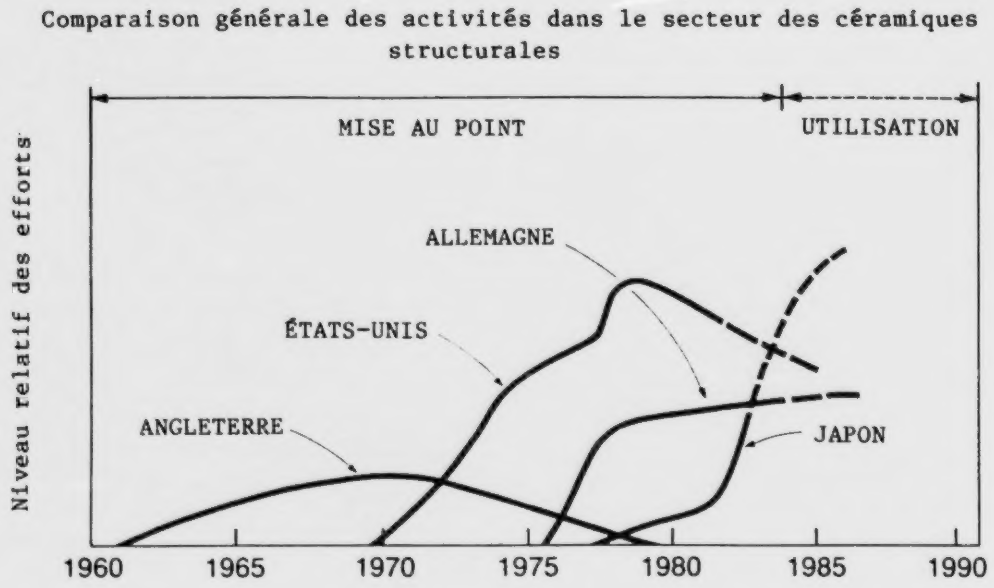


FIGURE 23 : Niveau international relatif des efforts déployés dans la mise au point des néo-céramiques structurales.
Source : Johnson, L.R., **et al.**

TABLEAU 18

Efforts internationaux actuels de recherche et de développement dans le secteur des néo-céramiques selon le type d'utilisation

Application	États-Unis	Japon	Europe de l'Ouest
Électronique : condensateurs multicouches	10 à 15 millions de dollars par an	Dépenses de recherche et de développement inconnues; le Japon aurait une avance de 10 p. 1 sur les États-Unis pour le nombre de brevets et d'ingénieurs	Aucune estimation
Détecteurs de gaz	Pas plus de 1 à 2 millions dollars par an	Dépenses de recherche et de développement inconnues; le Japon aurait une avance de 3 p. 1 sur les États-Unis pour le nombre de documents techniques et de 10 p. 1 pour le nombre de brevets	Probablement semblable au niveau des États-Unis
Structurale : moteurs thermiques	35 à 40 millions de dollars par an	Plus de 50 millions dollars par an	Moins que les États-Unis; l'Allemagne et la Suède sont les chefs de file européens
Outils coupants	Probablement pas plus de 1 million de dollars par an	Dépenses de recherche et développement inconnues; avance de 20 p. 1 sur les États-Unis pour le nombre de brevets de 1973 à 1982	Probablement plus que les États-Unis; la République fédéral d'Allemagne, seule, égale les États-Unis pour les brevets pour la période de 1973 à 1982.
Optique : optique intégré	Environ 10 millions de dollars par an	Légèrement moins de dépenses qu'aux États-Unis	Environ la moitié des dépenses des États-Unis

Source : Charles River Associates, 1984.

plus longtemps pour mettre au point une technologie industrielle naissante, qui prendra plus d'envergure et deviendra plus rentable que celle des compagnies des États-Unis et de l'Europe de l'Ouest. C'est le Japon qui investit le plus, en argent et en personnel scientifique et technique, pour la recherche et le développement des néo-céramiques, tant fonctionnelles que structurales. Les États-Unis semblent consacrer plus de ressources dans ce domaine que l'Europe de l'Ouest, mais considérablement moins que le Japon.

De plus, en vue de la poursuite des objectifs industriels futurs, les efforts déployés par le Japon semblent être mieux organisés. Leurs efforts sont polyvalents et sont basés sur leur prédominance présente dans la fourniture des poudres céramiques servant à la fabrication des néo-céramiques techniques; ces efforts se complètent par l'étude technique des produits et les procédés de fabrication.

La concurrence internationale future dans les applications techniques des néo-céramiques structurales dépendra grandement de la recherche fondamentale sur les matériaux, et de la mise au point technique de la production actuellement en cours dans différents pays.

Du point de vue de la concurrence internationale, les néo-céramiques ont manifestement une grande importance dans la stratégie nationale, puisque ce secteur de la technologie de pointe constitue aussi une base pour plusieurs industries de haute technologie. A cause du degré élevé et de la profondeur de la technologie requise, les progrès dans ce domaine constituent un foyer de rivalité entre les pays fortement industrialisés. Étant donné que de 30 à 40 % du coût de ces produits sont consacrés à la main-d'oeuvre, les produits fabriqués dans les pays en voie de développement, où les salaires sont relativement peu élevés, commanderont des prix plus avantageux qui les rendront compétitifs à l'échelle internationale. Dans le domaine des néo-céramiques, comme dans l'industrie sidérurgique, les pays partiellement industrialisés pourront, dans les années à venir, prendre la tête dans la fabrication de produits d'usage général, alors que le Japon et les autres pays, qui possèdent bien cette technologie, devront se lancer dans la production d'éléments de plus haute qualité et de plus haute valeur ajoutée.

6.2 Néo-céramiques aux États-Unis

6.2.1 Généralités

Les États-Unis ont été le chef de file mondial dans la recherche, la mise au point et la commercialisation des néo-céramiques, depuis le début des années cinquante. Bien que les États-Unis aient élaboré la plus grande partie des innovations technologiques et scientifiques nécessaires à la production des néo-céramiques, la suprématie commerciale du marché dans ce domaine appartient maintenant au Japon, qui approvisionne plus de 70 % du marché mondial. Présentement, tant à l'échelon industriel que gouvernemental, on s'inquiète beaucoup du fait

que, en dépit de la prédominance scientifique et technologique dans le domaine des néo-céramiques destinées aux utilisations structurales, comme les moteurs des voitures automobiles, la commercialisation " traîne de la patte " surtout à cause des obstacles technologiques qu'il reste encore à éliminer, à savoir : la possibilité d'une reproduction parfaite des éléments fabriqués, la fiabilité de service et les coûts compétitifs. On reconnaît aussi, tout comme au Japon, que la commercialisation devrait se faire parallèlement à la mise au point de la technologie, ce qui revient à dire qu'il faudrait prévoir, pour les néo-céramiques, des applications où le développement de la technologie correspond constamment aux besoins du marché. L'industrie, tout comme le gouvernement des États-Unis, a proposé un certain nombre d'initiatives pour reprendre la suprématie dans ce domaine.

6.2.2 Programmes, politiques et initiatives du gouvernement

Les principaux motifs susceptibles de convaincre le gouvernement d'appuyer la recherche et le développement dans le secteur des néo-céramiques sont :

- la concurrence exercée par le Japon, la République fédérale d'Allemagne et la Suède;
- les possibilités d'application aux produits de la défense nationale; et
- les questions de sécurité nationale, y compris l'assujettissement aux matériaux stratégiques, et les besoins spatiaux futurs.

Un certain nombre de ministères et d'agences du gouvernement américain accordent leur support à la recherche et à la mise à jour des néo-céramiques. Ces travaux se poursuivent soit dans des laboratoires gouvernementaux ou, à contrat, dans des instituts ou organismes de recherches industriels, universitaires ou privés. Les ministères ou agences en cause sont : le ministère de la Défense, par l'intermédiaire de la Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA); les agences de l'armée, de la marine ou de l'aviation des États-Unis; le ministère de l'Énergie; le ministère du Commerce par la voie du National Bureau of Standards; la National Aeronautics and Space Administration et la National Science Foundation. La dernière agence se limite à financer les travaux de recherche et de développement dans les universités.

La place importante que les éléments de néo-céramique occupent aujourd'hui dans la mise au point des moteurs d'automobiles ou dans d'autres sphères d'activités de haut rendement, est due à la prévoyance et à l'initiative de la DARPA ainsi qu'au support financier qu'elle a accordé à l'industrie depuis le début des années soixante-dix. L'embargo sur le pétrole de l'OPEP (1973) a fixé l'attention sur la conservation de l'énergie, l'assujettissement aux importations de pétrole et la nécessité d'utiliser des combustibles de rechange; toutes ces mesures ont besoin des néo-céramiques. A cause de cette nouvelle motivation, les programmes de recherche et de développement se sont considérablement élargis grâce au support financier du ministère de l'Énergie.

Au cours de la période allant de 1970 à 1982, le gouvernement a accordé son support à un certain nombre de programmes dans l'industrie, dans le but de démontrer la faisabilité technique de l'utilisation d'éléments néo-céramiques dans la mise au point de moteurs d'automobiles efficaces, au point de vue de l'utilisation du combustible. Tous ces programmes se sont attaqués au développement de moteurs à turbine à gaz, la seule exception étant un programme qui a été consacré au développement des moteurs Diesel. Trois compagnies surtout ont poursuivi des travaux sur les turbines à gaz : Ford Motor Company, la division Detroit Diesel Allison de la General Motors Corporation et Garrett Corporation. On a démontré, avec succès, l'utilisation possible d'un moteur à gaz dans un véhicule routier.

La compagnie Cummins Engine a exécuté tous les travaux sur la mise au point du moteur Diesel et elle a démontré avec succès le rendement d'un moteur Diesel adiabatique, sans système de refroidissement par l'eau, dans un camion de 5 tonnes de l'armée américaine.

Le ministère de l'Énergie accorde présentement son support à un quatrième programme qui se concentre sur les moteurs à turbine à gaz évolués. Dans le cadre de ce programme, la division Detroit Diesel Allison de la General Motors Corporation met actuellement au point le moteur AGT-100 afin de l'incorporer dans une voiture Pontiac Phoenix 1985 à carrosserie-X. La Garrett Corporation, avec l'aide de la Ford Motor Company, travaille présentement à la mise au point du moteur AGT-101 en vue de l'incorporer dans la famille des voitures Ford. Il s'agit là de programmes à long terme (de 1982 à 1990) et, jusqu'ici, les résultats sont très prometteurs. Le budget du ministère de l'Énergie, pour l'exercice financier 1984, est de 42,7 millions de dollars, sans compter une allocation de 9 millions de dollars au National Ceramic Technology Centre for Advanced Engines, situé au laboratoire national de Oak Ridge. Comme l'indique la figure 24, on estime à environ 140 millions de dollars le financement global du développement des moteurs en néo-céramique par le gouvernement américain pour la période de 1974 à 1982.

Trois études récentes ont déterminé qu'il était nécessaire de modifier la politique du gouvernement et de demander un appui plus direct, destiné à favoriser le secteur industriel des néo-céramiques dans le but de répondre aux menaces de l'étranger, et en particulier celles venant du Japon. L'étude du ministère de l'Énergie, fondée sur le modèle annuel du DRI de l'économie américaine, indique les effets macro-économiques (effets sur le produit national brut, l'emploi, les importations de combustible et la balance commerciale) de la suprématie des États-Unis dans la production d'éléments néo-céramiques pour les moteurs d'automobiles et recommande un appui financier beaucoup plus considérable du gouvernement pour la recherche et le développement.

En se basant sur une étude d'évaluation de la concurrence de l'industrie américaine des néo-céramiques, le ministère du Commerce a déterminé un certain nombre de solutions possibles destinées à encourager l'industrie américaine à se lancer dans l'étude des moteurs d'automobiles en néo-céramique et d'autres applications de rendement élevé. On peut regrouper les solutions en deux catégories. Tout d'abord, celles qui sont destinées à éliminer les obstacles technologiques; elles comprennent l'augmentation des efforts de recherche et de développement du gouvernement fédéral, de même que l'adoption de stimulants destinés à accroître les travaux de recherche et de développement de l'industrie privée dans les néo-céramiques. Le ministère s'est rendu compte que l'industrie privée hésitait à faire les efforts nécessaires, qui sont considérables, parce qu'il s'agit d'un marché à long terme. Parmi les autres solutions possibles dans cette catégorie il y a aussi des exemptions aux lois anti-monopoles accordées pour la recherche et le développement industriels coopératifs; l'amélioration de la capacité afin d'obtenir et de diffuser des renseignements scientifiques et techniques venant de l'étranger; et, l'accroissement des possibilités et des stimulants de formation offerts pour favoriser l'étude technique et la fabrication des produits de néo-céramique.

Deuxièmement, il y a des solutions qui aideront à créer ou à accroître les marchés qui s'offrent aux néo-céramiques, aussi bien à l'échelle nationale que pour l'exportation. Ces solutions comprennent : les achats accrus de néo-céramiques par le gouvernement fédéral pour les besoins militaires, spatiaux et autres; l'utilisation des politiques de réglementation fédérales pour augmenter la part du marché ayant trait aux néo-céramiques; donner l'avantage d'une assurance risques/responsabilité civile aux manufacturiers et aux utilisateurs des néo-céramiques.

Le gouvernement des États-Unis se préoccupe beaucoup des matériaux stratégiques à cause de leur importance pour les besoins de la défense, du bien-être économique de la nation et de sa position face à la concurrence internationale. Dans une étude récente, le Bureau de l'évaluation de la technologie du Congrès arrive à des conclusions semblables à celles du ministère de l'Énergie, que nous venons d'étudier.

A ce jour, la seule action ferme posée par le gouvernement a été l'adoption de la loi nationale sur les matériaux critiques de 1984, (s.373) qui prévoit l'établissement d'un conseil national des matériaux critiques qui relève du Bureau exécutif du Président. Ce conseil a la responsabilité d'évaluer la technologie de pointe requise pour s'aventurer dans de nouvelles avenues et améliorer la productivité à l'intérieur des industries de matériaux fondamentaux et de pointe, et de recommander, toutes les fois que les conditions l'exigent, la mise sur pied de centres de technologie industrielle. Après discussions avec des conseillers politiques bien informés, il semble peu probable que le gouvernement intervienne directement dans le monde des affaires pour favoriser l'industrie des néo-céramiques. Des précédents indiquent

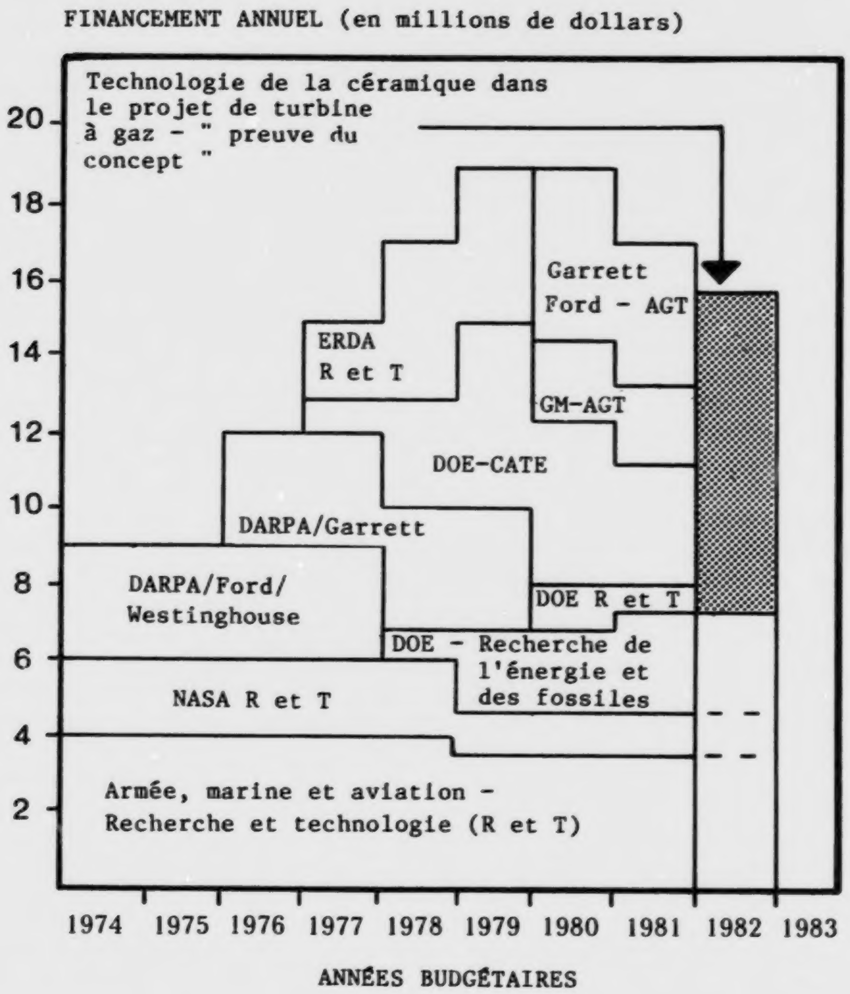


FIGURE 24 : Financement de la recherche et du développement des néo-céramiques structurales par le gouvernement américain. Source : Charles River Associates.

toutefois que, si la chose est importante, le gouvernement utilisera les services d'achat de la défense pour favoriser la recherche et le développement aussi bien que la croissance du marché.

6.2.3 Activité industrielle dans le secteur des néo-céramiques

En 1980, l'industrie des néo-céramiques aux États-Unis représentait une valeur de matériaux expédiés d'environ 600 millions de dollars dont 534 millions en éléments électroniques et seulement 65 millions en produits techniques. Il n'y a eu aucune expédition de pièces détachées en néo-céramique.

Il y a aux États-Unis au moins cinquante compagnies importantes qui produisent des composants électroniques, mais plusieurs d'entre elles sont divisées en sections qui ne produisent que des poudres ou se spécialisent dans un seul élément. Les compagnies américaines ne sont généralement pas aussi verticalement intégrées que les compagnies de céramiques du Japon où quelques entreprises comme Kyocera, Murata et NGK Spark Plug dominent la production des poudres les plus évoluées et d'une grande variété de composants électroniques. Il y a quelques entreprises américaines, dont IBM est l'exemple le plus remarquable, qui sont intégrées verticalement, mais leur production de néo-céramiques électroniques (spécialement les microcircuits) est une production captive qui n'apparaît pas dans les données commerciales. Les statistiques du commerce indiquent que les États-Unis ont perdu, en faveur du Japon, le secteur des composants électroniques de l'industrie des néo-céramiques. Bien que les entreprises des États-Unis paraissent se tirer bien d'affaire dans le domaine des condensateurs et des résistances, le marché des microcircuits est entre les mains de l'industrie japonaise.

Kyocera International, situé à San Diego, en Californie, représente 70 % des expéditions américaines de microcircuits. On considère toutefois que le marché des éléments électroniques a atteint le stade de la maturité et qu'il est un marché de produits à faible valeur ajoutée.

Il y a environ, comme on l'a mentionné plus haut, cinquante entreprises américaines qui font de la recherche et du développement ou une production commerciale restreinte de néo-céramiques techniques. Plusieurs d'entre elles sont actives dans des gammes de produits uniques ou spécialisés. Trente à quarante compagnies poursuivent des travaux de recherche et de développement sur les moteurs de néo-céramique. Comme il n'y a pas encore eu de production commerciale importante d'éléments de néo-céramique destinés à l'ingénierie, on ne peut pas encore évaluer facilement les tendances de ce marché.

Le tableau 19 présente la liste des compagnies américaines importantes lancées dans la production de néo-céramiques destinées à l'ingénierie.

Un certain nombre de compagnies qui ne travaillent pas traditionnellement dans le domaine de la céramique s'impliquent maintenant dans les néo-céramiques. Dans certains cas, elles le font pour tirer profit d'ouvertures nouvelles, pour diversifier leur production et parfois pour répondre à certains besoins inhérents à la compagnie même. Par exemple, on prétend que la compagnie IBM a investi plus d'un milliard de dollars US pour établir une installation destinée à la mise au point de ses propres ordinateurs. La liste qui suit présente certaines des compagnies de céramiques non traditionnelles importantes qui poursuivent présentement des travaux de recherche et de développement sur les néo-céramiques :

- IBM
- W.R. Grace
- Standard Oil (Ohio)
- Allied Chemical
- Dow Corning
- Celanese
- Stauffer
- Garrett
- Alcoa
- Union Carbide
- ICI Americas
- Dow Chemical
- PPG Industries
- Cabot
- American Cyanamid
- Air Products and Chemicals

Il n'est pas possible de déterminer l'importance des travaux de recherche et de développement que l'industrie américaine finance de son propre chef, parce que ces renseignements sont souvent considérés comme confidentiels ou noyés dans des données concernant des produits d'utilisation plus générale. A l'échelle nationale, l'industrie privée finance à peu près le même volume de travaux de recherche et de développement que le gouvernement fédéral. Ceci pourrait représenter une dépense annuelle courante de l'ordre de 100 millions de dollars pour la recherche et le développement des néo-céramiques. Parmi les 1 800 compagnies américaines de céramique énumérées dans le Bulletin of the American Ceramic Society (janvier 1983) on estime qu'il peut y en avoir 200 qui poursuivent des travaux de recherche et de développement sur les néo-céramiques. On croit qu'environ 1 000 scientifiques et ingénieurs consacrent leurs activités principales à la recherche et au développement des néo-céramiques alors qu'il peut y en avoir de 1 000 à 2 000 autres qui y participent de façon moins directe. Si on se base sur les niveaux actuels des salaires et des frais généraux, on en arrive à un chiffre de près de 100 millions de dollars consacrés à la recherche et au développement à l'échelle nationale.

En 1980, l'industrie céramique des États-Unis, traditionnelle aussi bien que de pointe, était une industrie de 50 milliards de dollars; plus de 100 des compagnies, classées dans la liste des 500 plus grosses entreprises américaines, produisent ou transforment des céramiques d'une façon ou d'une autre.

TABLEAU 19

Compagnies importantes des États-Unis poursuivant des travaux de recherche et de fabrication de néo-céramiques techniques

Outils coupants	Pièces d'usure
Kennametal Inc.	Carborundum Co.
Carboloy Systems Dept.	General Electric Co.
GTE Walmet Co.	Norton Co.
Teledyne Firth Sterling	Coors Porcelain Co.
Coors Porcelain Co.	ESK Corporation
Valenite	ART Inc.
TRW/Wendt-Sonis	
Talide Metal Carbides Corp.	
Adams Carbide Corp.	
Babcock and Wilcox	

Moteurs thermiques et pièces

Conception et mise au point des moteurs	Matériaux et pièces de céramique
Ford Motor Co.	Carborundum Co.
Garrett Corp.	Norton Co.
Cummins Engine Co.	Corning Glass Co.
General Motors Corp.	Coors Porcelain Co.
Westinghouse Electric Corp.	Ceramtech Inc.
General Electric Co.	GTE Sylvania
International Harvester	General Electric Co.
Hague International Co.	Kaman Sciences Corp.
Terratek Inc.	Dow-Corning Co.*
Caterpillar Tractor Co.	United Technologies Corp.
Pratt and Whitney Co.	Airesearch Casting Co.
	Ceradyne, Inc.
	DuPont*
	Celanese*

*Particulièrement impliquées dans la recherche et le développement de produits composites et de fibres néo-céramiques.

Source : Division d'analyse industielle, ministère du Commerce des États-Unis.

6.2.4 Sociétés professionnelles et techniques

L'American Ceramic Society est la société professionnelle officielle qui représente tout le milieu de la céramique aux États-Unis, aussi bien les scientifiques, les ingénieurs et les autres techniciens que les compagnies industrielles. Elle compte plus de 10 000 membres et son répertoire comprend environ 1 800 compagnies. La société comporte 11 divisions dont 5 englobent différents aspects des néo-céramiques.

Une autre société importante qui joue un rôle majeur est la Materials Research Society. En règle générale, seules les personnes impliquées dans la recherche sont membres de cette société.

6.2.5 Activités des universités dans le secteur des néo-céramiques

Un très grand nombre d'universités américaines poursuivent des travaux de recherche et de développement sur les néo-céramiques, et ce nombre croît rapidement. Ce nombre n'inclut pas seulement celles qui ont des départements officiels de céramique en vue de la formation d'ingénieurs et de scientifiques, mais d'autres qui poursuivent des travaux de recherche et de développement en néo-céramique dans d'autres disciplines comme la métallurgie et la science des matériaux, le génie électrique, la physique et la chimie.

On trouvera ci-dessous une liste de quelques-unes des universités importantes :

- Institut de Technologie du Massachusetts, Boston, Massachusetts
- Collège de céramique de l'État de New York, Alfred, New York
- Université d'état de la Caroline du Nord, Raleigh, Caroline du Nord
- Université d'état de l'Ohio, Columbus, Ohio .
- Université d'état de la Pennsylvanie, University Park, Pennsylvanie
- Institut Polytechnique Rensselaer, Troy, New York
- Rutgers, Université d'état du New Jersey, Piscataway, New Jersey
- Université de Californie, Berkley, Californie
- Université de Californie, Los Angeles, Californie
- Université de Floride, Gainsville, Floride
- Université de l'Illinois, Urbana, Illinois
- Université de l'Utah, Salt Lake City, Utah
- Université de Washington, Seattle, Washington

Tout récemment l'université Rutgers, avec l'aide du Conseil national de la recherche de Washington, D.C., a organisé un centre de recherches sur la céramique dans le cadre de l'expansion de son département de céramique. Ce centre de recherches compte plus de 30 industries membres qui paient une souscription annuelle de 30 000 \$. L'État du New Jersey se rend compte de l'importance des néo-céramiques comme matériaux de

base pour d'autres industries de technologie de pointe et a accordé environ cinq millions de dollars pour améliorer les installations du Centre.

L'Institut de Technologie du Massachusetts a un centre semblable pour la mise au point du traitement de la céramique et a une clientèle d'environ vingt industries.

Il semble qu'un certain nombre de nouveaux centres verront le jour au cours des années à venir suite à l'accroissement de l'intérêt pour les néo-céramiques, aussi bien dans l'industrie que dans le gouvernement.

6.3 Néo-céramiques en Europe

6.3.1 Généralités

Plusieurs pays d'Europe sont actifs dans la recherche et le développement ainsi que dans la commercialisation de matériaux et d'éléments de néo-céramique. Les facteurs qui expliquent cette situation sont : le désir d'améliorer l'efficacité énergétique des moteurs pour réduire les coûts de l'énergie et la dépendance des importations; les appréhensions touchant la disponibilité et le prix des néo-céramiques aux États-Unis et au Japon; les appréhensions ayant trait à l'effet de la mise au point américaine et nippone des néo-céramiques sur les industries de ces pays d'Europe; et, ce qui est plus important, la pleine connaissance du fait que les néo-céramiques peuvent constituer une ouverture unique pour mousser leurs industries métalliques, chimiques et manufacturières sur le marché mondial.

Les pays qui ont des programmes importants sont la République fédérale d'Allemagne, la Suède, l'Angleterre et la France.

6.3.2 Néo-céramiques en République fédérale d'Allemagne

La République fédérale d'Allemagne a terminé un programme national de recherche et de développement au cours de la période de 1974 à 1983. Ce programme était destiné à mettre au point et à commercialiser des éléments de néo-céramique en vue de leur utilisation dans les moteurs d'automobiles ou dans d'autres sphères d'activités de rendement élevé. Il s'agissait là d'un programme conjoint, organisé par le gouvernement, l'industrie, les universités et les organismes de recherche, qui disposait d'un budget total de l'ordre de 100 millions de marks. Le gouvernement et l'industrie se sont partagés les dépenses du programme à parts égales; cependant, les frais courus par les instituts de recherches universitaires étaient couverts à part entière par le gouvernement. Trois fabricants de moteurs, sept de céramiques et sept organismes de recherche ont participé au programme. Le tableau 20 donne la liste des participants, alors que le tableau 21 présente la répartition du financement entre les différents participants.

TABLEAU 20

Liste des industries participant au programme national de recherches de la République fédérale d'Allemagne sur les néo-céramiques destinées aux moteurs

Fabricants de moteurs	Instituts et universités
Volkswagen	Max Planck Institut, Stuttgart
Daimler Benz	T.U. Berlin
MTU	T.U. Clansthal - Zellerfield
	IZFP Saarbrücken
	T.U. Karlsruhe
	Universitat Erlangen
	DFVLR Köln

Fabricants de céramique

Annawerk
Degussa
ESK
Feldmühle
Sigri
H.C. Starck
Rosenthall

TABLEAU 21

Budget du programme national allemand pour la période de 1974 à 1980 (en milliers de marks)

	Part du BMFT	Total
Industries	29 686	59 372
Instituts	4 932	4 392
	34 618	64 304

Source : E.M. Leone **et al.**

La République fédérale d'Allemagne vient de lancer un nouveau programme de dix ans portant sur les matériaux de pointe en y attribuant un budget de 70 millions de marks pour l'année budgétaire 1985. Les domaines visés par le programme sont les suivants : la céramique, la métallurgie des poudres, les matériaux composites et les matériaux à haute température. On a affecté un autre montant de 14 millions de marks aux projets ayant trait à la corrosion, à la tribologie et à l'usure. Il n'est pas possible de déterminer le montant exact destiné aux néo-céramiques, mais il semble être très élevé.

La raison d'être du lancement de ce programme de dix ans semble reposer sur deux facteurs. Tout d'abord, la reconnaissance du fait que le succès de la mise en valeur et de la commercialisation des éléments de néo-céramique est une chose assurée pour l'avenir, à cause des montants considérables qui y sont consacrés à l'échelle internationale, surtout aux États-Unis et au Japon. Deuxièmement, à cause de toute une série de raisons : vif désir de l'industrie de protéger le marché national avec sa position technologique concurrentielle acquise jusqu'ici; désir de réduire les coûts d'énergie et de diminuer l'assujettissement aux matériaux stratégiques actuellement importés; appréhension quant à la menace à long terme, particulièrement envers les industries des métaux, que laissent planer les matériaux de néo-céramique en ce qui a trait au produit national brut, à l'emploi et à d'autres questions socio-économiques.

Lors du choix des sous-programmes pour le programme de dix ans, le ministère allemand de la Science et de la Technologie a eu de longues discussions avec l'industrie et les universités. Ce programme représente donc les buts et les engagements financiers de la République fédérale d'Allemagne à l'échelle nationale.

On a accompli des progrès remarquables dans le premier programme national, aussi bien dans la mise au point d'éléments de néo-céramique que dans leur incorporation aux moteurs d'automobiles. La compagnie H.C. Starck a élaboré la technologie de fabrication pour les poudres de nitrure de silicium et elle est maintenant un important fournisseur mondial. Les fabricants d'éléments de céramique ont mis au point des capacités de fabrication, mais il reste encore à résoudre les problèmes importants de reproductibilité lors de la fabrication, de la fiabilité de service et des prix. Par exemple, Electroschmeltzwerk Kempten (ESK) a mis au point la capacité de fabrication d'éléments de carbure de silicium destinés aux automobiles : la compagnie trouve cependant que les marchés prendront encore un certain nombre d'années à s'établir, jusqu'à ce que ces problèmes soient résolus de façon à satisfaire les fabricants d'automobiles. SIGRI, pour sa part, concentre ses efforts à court terme sur des utilisations qui n'ont rien à voir avec les automobiles, comme les échangeurs de chaleur, les produits résistant à l'usure et à la corrosion. Par ailleurs, Feldmühle a déjà mis sur le marché des outils coupants de néo-céramique, faits de nitrure de silicium.

On a constaté un nombre de changements dans l'intérêt que portent les compagnies initialement impliquées dans le progrès des néo-céramiques. Par exemple, Degussa a mis fin à sa participation peut-être parce que les ouvertures dans le marché étaient trop loin dans l'avenir. Rosenthall a réduit le rôle de sa division des produits techniques à une entreprise à riques partagés avec Hoecht, à cause des frais élevés encourus par la poursuite de travaux de recherche et de développement dans un secteur où le marché ne permet pas un recouvrement des dépenses à court terme.

Il est aussi évident qu'un certain nombre de grandes compagnies s'intéressent à participer aux avantages potentiels à long terme que représentera le marché des néo-céramiques. Bayer est en train de s'installer pour fabriquer des poudres céramiques. Hoecht, par l'intermédiaire de Rosenthall, établit sa présence sur le marché. Siemens, une des plus grandes entreprises allemandes dans la fabrication des céramiques électroniques, semble limiter ses activités au marché existant.

Daimler Benz et Volkswagen ont mis au point des moteurs à turbine à gaz pour utilisation dans les voitures automobiles et autres véhicules; Daimler a toutefois pris de l'avance dans la démonstration pratique de ces moteurs dans des véhicules. Elle semble avoir confiance dans cette application, à long terme, et continue ses recherches sur les moteurs à turbine à gaz comme sur d'autres applications dans les moteurs à essence, comme les turbocompresseurs. Daimler Benz est un des plus importants fabricants de camions et croit à l'avenir des moteurs à turbine à gaz pour ces véhicules. Il y a toujours, à l'arrière plan, les besoins de la défense, particulièrement les chars d'assaut.

D'autre part, la compagnie Volkswagen est très prudente sur le rôle que pourrait jouer le moteur à turbine à gaz dans les petites voitures et autres véhicules légers qui constituent son principal marché. Elle étudie minutieusement l'utilisation d'éléments de céramique dans ses moteurs actuels, aussi bien à essence que Diesel, et a confiance de trouver là un certain nombre d'utilisations avantageuses. Elle fait, dans ses propres laboratoires, des efforts considérables pour vérifier les progrès des éléments en néo-céramique et est donc en mesure de tirer profit des avantages possibles au moment où ils se présentent. Les turbocompresseurs en céramique et les éléments de moteurs Diesel semblent être en tête de liste.

6.3.3. Néo-céramiques en Suède

6.3.3.1 Généralités

Après la République fédérale d'Allemagne, la Suède est le pays d'Europe qui déploie le plus d'activités dans la mise au point des néo-céramiques en vue de leur utilisation dans les moteurs. Comme le montrent les données ci-dessous, l'industrie céramique en Suède est relativement modeste. Cependant, ces chiffres ne s'appliquent qu'aux

lignes de produits spécifiques. Par ailleurs, les compagnies appartiennent à des entreprises beaucoup plus considérables qui disposent de budgets de développement assez importants. Il est très probable que ces entreprises soient intéressées au potentiel économique à long terme des néo-céramiques.

Compagnie	Gamme de produits	Chiffre d'affaires (en millions de dollars)	Nombre d'employés
Ifo	Électronique Appareils sanitaires Ménagers émaillés	70	1 500
Gustavsberg	Appareils sanitaires Ménagers émaillés Brique	70	1 300
Hoganas	Produits de construction Réfractaires Brique	60	900
Rorstrand	Produits ménagers	20	650
Forshammars Bergverk	Produits réfractaires	18	200

Il est plus probable toutefois que les intérêts de la Suède se concentrent davantage sur son industrie automobile assez importante et rentable et qui joue un rôle important dans le secteur de l'emploi et la balance commerciale. Volvo, qui est une compagnie connue à l'échelle mondiale, fabrique ses propres voitures, camions, autobus et bateaux. SAAB-SCANIA, un autre important fabricant de véhicules, joue aussi un rôle très important dans le secteur de l'emploi et la balance commerciale. La compagnie Volvo Flymotor fabrique des moteurs à réaction pour les avions de combat suédois et participe aussi à un effort de coopération internationale visant à produire des moteurs à réaction pour l'aviation civile.

Stal Laval conçoit et fabrique des turbines à gaz et à vapeur pour les centrales d'énergie, l'utilisation industrielle et la propulsion des navires.

La compagnie United Turbine, une filiale de Volvo, travaille présentement à la mise au point d'un petit moteur à turbine à gaz pour les véhicules automobiles. United Stirling appartient à un secteur de l'industrie dont le gouvernement est propriétaire et travaille à la mise au point de moteurs Stirling pour les utiliser dans diverses sphères comme les systèmes à énergie totale, les petits camions de livraison, etc.

6.3.3.2 Programme national de la Suède

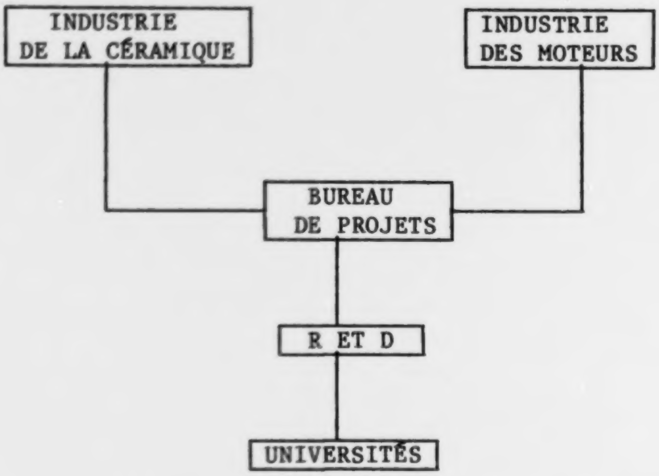
Ayant reconnu l'importance de se placer en tête de la mise au point de moteurs plus efficaces pour protéger les intérêts des fabricants de moteurs et d'automobiles du pays, le Bureau suédois de développement technique (STU), qui est un organisme gouvernemental, a décidé, dès 1976, d'appuyer financièrement les travaux de recherche sur les néo-céramiques destinées à être utilisées dans les moteurs thermiques. Le moment choisi semble indiquer que le STU a suivi de près les travaux de développement aux États-Unis et en Allemagne pour en venir à la conclusion que les meilleurs intérêts de la Suède exigeraient que le pays lance son propre programme national pour protéger sa position concurrentielle en ce qui a trait tant au potentiel de ses exportations qu'à la protection de son industrie et de ses marchés nationaux.

Le Bureau suédois de développement technique (STU) a décidé d'appuyer deux activités parallèles, l'une dirigée vers le développement des matériaux et l'autre vers la mise au point des moteurs.

L'objectif à long terme du programme de développement des matériaux était de favoriser et de faciliter la production nationale d'éléments de moteurs en céramique. Ce travail fut confié à l'Institut suédois de recherches sur les silicates à Trondheim.

L'étude technique des moteurs et l'introcution des éléments en céramique a été confiée aux fabricants de moteurs et d'automobiles. On a donné à ces compagnies l'appui financier nécessaire pour qu'elles puissent se procurer à l'étranger les éléments de céramique nécessaires pour leur permettre de commencer tôt la mise au point de la technologie avant même que l'industrie céramique suédoise puisse produire ces pièces à l'échelon national.

On trouvera ci-dessous l'organigramme utilisé pour assurer la gestion de ce programme :



Les travaux du Groupe de R et D étaient dirigés par un bureau de projets comprenant des représentants de l'industrie de la céramique, des fabricants de moteurs et des universités; une telle organisation a permis une étroite collaboration entre le Groupe de recherche et de développement et l'industrie. Par exemple, les fabricants de moteurs pouvaient présenter des spécifications relatives aux éléments des moteurs répondant à leurs besoins, et établir ainsi des directives très importantes pour les recherches à exécuter. Le Groupe de recherche et de développement pouvait aussi aider l'industrie moteurs à déterminer les caractéristiques des éléments achetés chez des fournisseurs de l'extérieur. Les entreprises industrielles qui ont participé au programme national sont énumérées ci-dessous :

AB Fordhammars Bergverk, Goteborg
AB Gustavsberg, Division Porslin, Gustavsberg
AB Sandvik Hard Materials, Stockholm
AB Volvo, Goteborg
ASEA Ceram
Hoganas-Keramik AB, Hoganas
Ifo Electric AB, Bromolla
KemaNord Industrikemi AB, Ljungaverk
Rorstrand AB, Lidkoping
SAAB-SCANIA AB, Sodertalje
United Stirling AB, Goteborg
United Turbine AB, Malmo
Volvo Flygmotor AB, Trollhattan

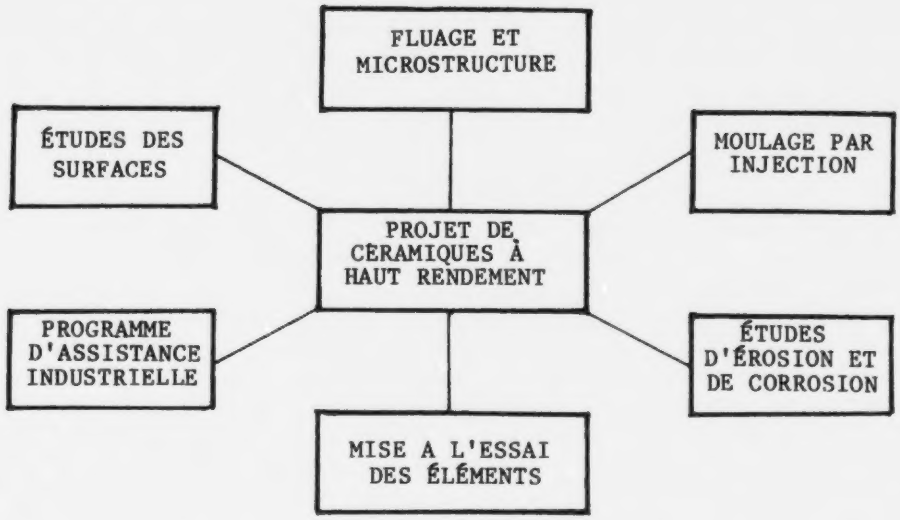


FIGURE 25 : Programme de développement des néo-céramiques structurales en Suède.

On ne dispose pas de détails sur les travaux de recherche et de développement exécutés au sein des compagnies. Par contre, les détails des travaux exécutés à l'Institut national de recherches sur les silicates (Svenska Silikatforsknings Institute) sont disponibles et sont présentés à la figure 25 qui précède. L'Institut comprend au total 15 employés, dont 5 consacrent leur temps au programme sur les céramiques à haut rendement pour les moteurs. Le programme initial lancé en 1976 se continue présentement; il devra de poursuivre durant la période de 1984 à 1987 et dispose d'un budget annuel d'environ 800 000 $.

6.3.3.3 Activités industrielles

ASEA Ceram, a tout d'abord été une division de ASEA AB et est maintenant une entreprise à risques partagés entre ASEA AB, Volvo AB, et KemaNord Industrikemi AB. Elle a participé au programme suédois depuis le début, en 1976. La compagnie a mis au point un procédé spécial de matriçage isostatique à chaud (HIP) pour la fabrication de pièces de moteurs complexes en nitrure de silicium, comme les rotors et les stators. On prétend que cette technique convient bien à la production en grandes séries d'éléments de néo-céramique de toute composition. On utilise les techniques de moulage par injection pour préformer les pièces avant de recourir au procédé HIP. ASEA Ceram a entrepris une mise en marché vigoureuse de cette technologie en l'offrant, sous brevet, aux compagnies intéressées. Norton, aux États-Unis vient tout juste de conclure une entente dans ce sens.

La compagnie United Turbine, qui est une filiale de Volvo, est en train de mettre au point un petit moteur à turbine à gaz comportant des éléments en céramique et qu'on pourra utiliser dans les modèles de voitures automobiles actuellement en production. Le moteur est un modèle spécial appelé système KTT et on prétend qu'il a un certain nombre d'avantages, dont :

- une efficacité et un rendement élevés;
- une conception convenant aux véhicules compacts;
- le moteur est intégré à la transmission;
- le moteur pourra s'adapter tôt à l'utilisation de la céramique.

Le moteur de première génération, appelé KTT MkI, a été conçu à partir d'un moteur tout métallique; toutefois, on y introduit des éléments de céramique dès que des progrès technologiques sont réalisés. L'objectif final est un moteur, appelé MkII, dans lequel tous les éléments des zones chaudes seront faits de nitrure de silicium.

Les compagnies Volvo et SAAB-SCANIA travaillent toutes les deux à la mise au point de moteurs à essence et Diesel comportant des éléments de céramique, mais on ne dispose pas encore de détails sur ce sujet.

La compagnie AB Sandvik Hard Materials poursuit l'étude d'outils coupants faits de néo-céramiques, en particulier ceux de nitrure de silicium et de sialon. Elle a déja entrepris la mise en marché de certains composés.

6.3.4 Néo-céramiques au Royaume-Uni

Le Royaume-Uni a commencé, dès le début des années soixante à mettre au point des néo-céramiques destinées aux moteurs; les travaux de recherche et de développement se sont poursuivis tant dans l'industrie (Lucas, Rolls Royce) que dans les laboratoires gouvernementaux. Plus tard, durant les années soixante-dix, il s'est produit deux événements importants : tout d'abord, la découverte des sialons à l'université de Newcastle-Upon-Tyne, et, deuxièmement, la mise au point de la technologie du carbure de silicium Refel par l'administration de l'Énergie atomique du Royaume-Uni. En dépit de ces importantes percées technologiques, l'intérêt se mit à décroître tant du côté de l'industrie que du gouvernment à cause de l'absence de marchés commerciaux immédiats susceptibles de justifier les importants engagements financiers requis pour la recherche et le développement comme pour la fabrication.

Sous la forte influence des progrès internationaux, particulièrement ceux des États-Unis et du Japon, l'industrie, tout comme le gouvernement, ont maintenant reconnu la nécessité de s'engager financièrement à l'échelon national dans la mise en œuvre des néo-céramiques. Cet engagement et cet enthousiasme renouvelés sont fondés sur un certain nombre de facteurs : le Royaume-Uni s'est rendu compte qu'il ne peut pas rester en arrière par rapport à ses concurrents qui font déjà de grands progrès dans la mise au point et la commercialisation des néo-céramiques; il est conscient qu'un renouveau des investissements en recherche et en développement donnera à l'industrie l'occasion d'accélérer le progrès et de dépasser d'une bonne longueur, la concurrence étrangère, ce qui lui permettra de récupérer sa part du marché et du commerce à l'échelle mondiale.

Quant à l'industrie, elle a déjà pris des mesures précises pour remplir ses engagements. Deux " clubs " industriels se sont formés. La mise au point des moteurs à turbine à gaz avec les éléments céramiques est dirigée par la compagnie Rolls Royce, et on a baptisé le consortium des dix compagnies qui participent à ces travaux, le Club Rolls Royce.
Le gouvernement britannique, par l'intermédiaire du ministère du Commerce et de l'Industrie, accorde son aide financière à douze programmes axés sur la mise au point de procédés de fabrication appropriés, sur l'étude du comportement des céramiques, particulièrement dans des conditions de contrainte existant dans le moteur à turbine à gaz, et sur l'élimination des défauts dans les céramiques. On estime le coût de ces projets à environ 9 millions de livres durant la période de 1985 à 1988.

Le second " club " est connu sous le nom de Consortium for Ceramic Applications in Reciprocating Engines (CARE) (Consortium des applications céramiques dans les alternateurs) et comprend un groupe de 20 compagnies, dont des fabricants d'automobiles, de pièces d'automobiles et de céramiques. Il compte, parmi ses membres : Ford, British Leyland, Morgan Matroc, Lucas, Doulton, Turner-Newall, Smith Industries, Royal Worcester, Associated Engineering Limited, Perkins Engine et GKN Technology Limited. Le club travaille, présentement, à la rédaction de propositions détaillées qu'il soumettra au gouvernement.

De son côté, le gouvernement pense à lancer un programme de soutien général à l'industrie qui coûtera environ 120 millions de livres, pour une période de cinq ans; l'industrie contribuera au programme pour la moitié de ce montant, environ. Ce budget servira aux matériaux de pointe en général; la partie du montant global qui sera attribuée aux néo-céramiques n'est pas connue. Dans son évaluation des montants qu'il s'engage à investir, le gouvernement semble être parfaitement conscient des ouvertures que le programme créera pour l'industrie à long terme. Il y a deux autres facteurs qui jouent un rôle, soit la disponibilité d'installations et de personnel scientifique et techniques compétents dans les laboratoires industriels, universitaires et gouvernementaux; la longue période de temps requise pour l'innovation, la mise au point et l'exploitation des matériaux et les risques élevés qui en découlent, quand on les compare à d'autres technologies.

On ne dispose pas de détails sur les activités de recherche et de développement dans l'industrie. La British Ceramic Research Association ou BCRA (Association britannique de recherches en céramiques) s'est engagée activement dans la mise au point des néo-céramiques et dispose d'un personnel de 35 employés environ. La BCRA exécute ses travaux pour le compte de compagnies dans le cadre de contrats. De plus, elle administre un programme important, financé en partie par la Communauté économique européenne et le gouvernement du Royaume-Uni.

Certaines universités (tableau 22) participent activement à la mise au point des néo-céramiques, particulièrement l'université de Leeds et l'université de Newcastle-Upon-Tyne. Compte tenu du renouveau d'intérêt manifesté par l'industrie et le gouvernement, il est probable que d'autres universités recevront de l'aide financière pour entreprendre des travaux dans ce domaine.

La UK Atomic Energy Authority ou AREA (Administration de l'énergie atomique du Royaume-Uni) à Harwell, concentre ses travaux sur la mise au point de la technologie des revêtements au plasma et, en vertu de contrats, accorde son aide à un certain nombre de fabricants de pièces d'automobiles pour la mise au point de telles pièces.

Le tableau 23 présente une liste de compagnies d'automobiles, de moteurs et de céramique qui travaillent dans le domaine des néo-céramiques.

6.3.5 Néo-céramiques en France

Les recherches sur les céramiques techniques en France n'ont pas commencé aussi tôt qu'au Royaume-Uni, et le développement industriel de ces nouveaux matériaux n'a pas évolué aussi rapidement qu'aux État-Unis, au Japon et en République fédérale d'Allemagne. La France a cependant manifesté un intérêt croissant pour les céramiques techniques au cours des quinze dernières années, et des travaux importants de recherche et de développement se poursuivent dans les universités, les laboratoires gouvernementaux et l'industrie.

Le développement des céramiques techniques en France n'a pas donné naissance à des programmes aussi bien définis que ceux qui existent au Japon, aux États-Unis et en République fédérale d'Allemagne; ce fait est dû, en grande partie, aux politiques du gouvernement qui vise à donner un appui financier aux projets à court terme orientés vers les résultats plutôt qu'aux programmes à long terme comportant des facteurs de risque.

Certaines universités font une étude poussée des propriétés fondamentales des néo-céramiques et de leur traitement. L'appui financier leur vient des divers ministères du gouvernement : la Recherche, la Défense, l'Industrie, etc. De plus, le Centre national de recherches scientifiques (CNRS), qui est l'équivalent du Conseil national de recherches au Canada, a ses propres laboratoires où se poursuivent d'importantes recherches fondamentales. Enfin, le CNRS finance des recherches dans diverses universités. La durée moyenne des programmes semble être de deux ans.

Les entreprises industrielles obtiennent auprès des agences gouvernementales, particulièrement des ministères de la Défense et du Commerce, un plus grand soutien pour la recherche et le développement. On favorise aussi la poursuite de programmes conjoints entre l'université et l'industrie, particulièrement dans les domaines de la mise au point des matériaux et des procédés de pointe.

On trouvera ci-dessous un résumé des activités industrielles ayant trait aux néo-céramiques.

Céramiques d'alumine

Rhône-Poulenc est le principal fabricant de poudres d'alumine pour les céramiques. On en produit de diverses grosseurs pour les produits réfractaires aussi bien que pour les céramiques techniques. Deux compagnies plus petites, Criceram, du groupe Péchiney, et la Pierre Synthétique-Baikowski, sont des chefs de file à l'échelle mondiale dans la fabrication de poudres d'alumine très pures, dérivées de l'alun, pour la fabrication d'enveloppes translucides dans les lampes à vapeur de sodium à haute pression.

TABLEAU 22

Liste des universités et des laboratoires gouvernementaux travaillant sur les néo-céramiques au Royaume-Uni

Universités	Laboratoires gouvernementaux
Université d'Aberdeen	UK Atomic energy Authority
Université de Leeds	British Nuclear Fuels Limited
Université de Newcastle-Upon-Tyne	Admiralty Marine Testing Est.
Université d'Oxford	British Ceramics Research
Université de Sheffield	Royal Radar Establishment
Université de Warwick	National Gas Turbine Est.

TABLEAU 23

Liste des industries travaillant sur les néo-céramiques au Royaume-Uni

Compagnies d'automobiles et de moteurs	Compagnies de céramique
Leyland Diesel	AED (Silicon Nitride) Ltd.
B.L. Technology	Alcan International
Ford UK	Magnesium Electron
Rolls Royce	Morgan Matroc
GKN Technology Ltd.	Doulton Industrial Products
Perkins Engine	Turner-N Wall Materials Ltd.
AE Turbine Components Ltd.	B.P. Research Ltd.
	Royal Worcester
	Lucas Cookson
	Chloride Silent Power
	Plessy
	ICI

Trois compagnies, Cice-Isolantite, du groupe Stettner, Desmarquest, du groupe Péchiney et Ceraver, du groupe CGE, produisent principalement des céramiques d'alumine frittées. La gamme des produits comprend des pièces d'usure et de friction, des outils coupants, des creusets, des prothèses médicales, des blindages ainsi que des céramiques optiques et électroniques.

Céramiques de zircone

Les céramiques de zircone semblent susciter de plus en plus d'intérêt en France, probablement à cause de leur utilisation possible dans les moteurs Diesel.

Thann et Mulhouse, du groupe Rhône-Poulenc, et Criceram, du groupe Péchiney, produisent différentes catégories de poudres de zircone destinées à la fabrication de céramiques de zircone partiellement stabilisées aussi bien que de poudres très fines convenant aux céramiques ZTC.

SEPR, du groupe Saint-Gobain, est un fabricant de matériaux réfractaires fondus de renommée mondiale, destinés aux fours de fusion du verre. C'est aussi un fournisseur important de matériaux de zircone servant au meulage et un fournisseur futur de zircone pour la fabrication de céramiques techniques.

Desmarquest, du groupe Péchiney, est le principal fabricant français de céramiques PSZ aussi bien que de détecteurs d'oxygène en zircone. Ceratech, qui est une entreprise à risques partagés groupant Renault et Norton, fabrique des céramiques de zircone-mullite et se prépare à répondre aux besoins futurs de néo-céramiques de Renault.

La pulvérisation sous plasma de revêtement à base de ZrO_2 et de Cr_2O_3 est une technique utilisée par un certain nombre de compagnies dont Le-Guellec, SFEC, CEA, Leroy-Somer, Soma Europe Transmission, Turbomenca, SNIAS et SNECMA.

Carbure de silicium

Marcoussis, du groupe CGE, met actuellement au point des céramiques de carbure de silicium alors que Ceratec en a déjà entrepris la production commerciale. On utilise présentement ces matériaux pour la fabrication de pièces d'usure et de friction, d'échangeurs de chaleur à température élevée, de ventilateurs et d'outillage destiné à l'énergie atomique.

Nitrure de silicium et sialons

En France, les fournisseurs de poudre de nitrure de silicium sont : Rhône-Poulenc, ELF et, plus récemment, Criceram.

Desmarquets et Ceratech produisent du nitrure de silicium et des sialons. Desmarquest a mis au point des poudres de sialon à coût peu élevé, de même que SSN et des HPSN. Ceratech travaille à la production de céramiques de rendement élevé à base de nitrure de silicium par des techniques de frittage sous pression suivis du matriçage isostatique à chaud (HIP). Parmi les utilisations en perspective pour ces produits, on peut citer des éléments d'usure, des pièces structurales à haute température, des éléments de laminage, des outils coupants et des roulements à billes.

Produits fibreux mixtes

En règle générale, les entreprises industrielles produisent des matériaux mixtes " céramiques-céramiques " pour les besoins de la défense. Les compagnies SEP et Aérospatiale sont bien connues pour leurs composés mixtes à rendement élevé. SEP travaille surtout sur des systèmes C-SiC, SiC-SiC et C-Al_2O_3, alors que la compagnie Aérospatiale se consacre principalement aux systèmes SiO_2-SiO_2 et SiO_2-SiC. Les marchés où s'écoulent ces produits comprennent les armements, les missiles, les avions civils et les voitures de course. Marcel Dassault Co. est aussi un important fabricant de composés mixtes à rendement élevé, destinés à sa propre fabrication d'avions de chasse. Desmarquest travaille présentement à la mise au point de longues fibres d'Al_2O_3, mais produit déjà des fibres de ZrO_2.

Utilisation dans les moteurs

Les fabricants français d'automobiles, le groupe nationalisé Renault et la compagnie privée PSA du groupe Citroën-Peugeot-Talbot, aussi bien que les compagnies qui s'intéressent aux moteurs à grande puissance, dont SEMT, du groupe CGE, travaillent dans le domaine des moteurs Diesel. Les moteurs à turbine à gaz n'ont pas, semble-t-il, suscité beaucoup d'intérêt et on accorde plus d'attention aux moteurs Diesel à " refroidissement minimal ", utilisant la zircone comme matériau isolant.

6.4 Néo-céramiques au Japon
6.4.1 Généralités

La mise au point et la commercialisation des néo-céramiques dans leur ensemble, constituent le fer de lance de la stratégie industrielle du Japon. L'industrie et le gouvernement collaborent étroitement à la réussite de cette entreprise. Les forces du marché stimulent l'intérêt et l'engagement financier de l'industrie, particulièrement le besoin des matériaux requis pour alimenter les autres industries de technologie de pointe et l'énorme marché, en puissance, de l'utilisation des néo-céramiques dans les moteurs. L'intérêt et les engagements financiers du gouvernement sont dictés par les besoins du pays et par la croyance que les néo-céramiques constituent la solution rêvée de plusieurs des problèmes énergétiques du Japon, qu'elles joueront un rôle vital de soutien dans la mise au point d'industries d'avant-garde, comme la recherche de substituts pour le pétrole, les industries aéronautiques

et spatiales, l'industrie biotechnologique et électronique, et qu'elles comportent, en elles-mêmes, les forces voulues pour donner naissance à des industries entièrement nouvelles.

Le Japon est déjà un chef de file, à l'échelle mondiale, dans le domaine des néo-céramiques : sa production représente à peu près la moitié de celle du monde entier et il domine dans la fabrication des éléments électroniques, particulièrement dans l'assemblage des microcircuits. On reconnaît généralement que le Japon a gagné la course à la suprématie dans le marché des " céramiques fonctionnelles " et qu'il est en tête du peloton dans la course à la suprématie mondiale dans le marché des " céramiques techniques ".

De l'avis de la majorité des gens, le Japon a déployé de grands efforts, aussi bien à l'échelon public que privé, pour dominer le marché international des néo-céramiques. La preuve de ce fait est qu'on estime que le Japon s'est accaparé environ 50 % du marché mondial actuel des néo-céramiques. Le Japon a déjà commencé à fabriquer certains éléments céramiques pour les moteurs Diesel, dont 30 000 bougies à incandescence et 20 000 chambres à turbulence, par mois. Certaines compagnies ont commencé la production des turbocompresseurs en céramique et en fabriquent environ 1 000 par mois. Le gouvernement du Japon et, ce qui est plus important encore, le milieu bancaire du Japon, semblent s'être engagés à assurer le succès en finançant des travaux considérables de recherche et de développement, en poursuivant des stratégies de prix et en créant des programmes de formation vigoureux pour faire naître et mieux préparer les talents techniques requis.

Le Japon est déjà à la fine pointe de plusieurs secteurs de la technologie et il doit, par conséquent, mettre au point de nouvelles technologies, avant les autres pays. Ces constatations ont toutes deux influencé la formation d'une opinion nationale, qui veut que le Japon modifie ses politiques relatives à la science et à la technologie pour passer de l'" imitation " à l'" invention " et à la " créativité ". Ce nouvel esprit national est l'outil essentiel qui permettra au Japon d'atteindre la suprématie mondiale dans le domaine des néo-céramiques.

6.4.2 Rôle et influence du gouvernement

L'origine de l'intérêt déployé par le Japon pour les néo-céramiques est une combinaison de nécessités économiques et d'ouvertures. Les pays du Tiers monde qui disposent d'une main-d'oeuvre à bon marché, non seulement menacent les industries de base comme l'aluminium, l'acier et les matériaux réfractaires, mais ils exercent de fortes pressions économiques sur certaines industries de technologie de pointe. Le Japon s'attend à ce que les progrès de l'industrie des néo-céramiques contribuent fortement à la poursuite de certains de ses objectifs nationaux les plus importants :

° comme le Japon est un pays pauvre en richesses naturelles, l'utilisation des néo-céramiques lui permettra de substituer des matières premières domestiques aux matières premières importées, et contribuera aussi à la conservation de l'énergie, diminuant ainsi sa dépendance envers le pétrole importé;*

° la supériorité du Japon dans le domaine des céramiques électroniques donne un avantage additionnel à ses industries électroniques déjà puissantes;

° si le Japon atteint la suprématie mondiale dans le domaine des néo-céramiques techniques, il pourra exporter des quantités considérables de ces produits mêmes, ce qui ajoutera, indirectement, à la valeur de ses exportations d'automobiles, de machines-outils et de produits aérospatiaux.

Le tableau 24 présente un aperçu de l'importance, pour le gouvernement japonais, des sciences et des techniques avancées. Certains ministères, dont le ministère de l'Éducation, appuient financièrement les recherches faites dans les universités sur les néo-céramiques. De plus, le ministère du Commerce international et de l'Industrie ainsi que l'Agence de la science et de la technologie appuient les recherches faites en ce domaine.

Grâce aux relations tissées entre le gouvernement japonais et le monde des affaires, il est tout naturel que, lorsque le gouvernement établit des lignes de conduite, le monde des affaires les accepte. C'est pourquoi l'appui qu'accorde le gouvernement à certains secteurs technologiques spécifiques exerce une influence considérable sur l'ensemble des efforts nationaux. Le tableau ci-dessous permet de mieux saisir ce fait et établit une comparaison entre la valeur des recherches et la proportion assumée par les gouvernements de divers pays.

---

* On estime que l'utilisation des néo-céramiques permettra au Japon de réduire sa consommation de pétrole brut de 10 % , et d'économiser, annuellement, 240 $ d'essence par voiture. On prévoit aussi une économie de 10 % de cobalt.

Pays	Année	Dépenses totales - Recherche et développement (en milliers de $)	Proportion assumé par le gouvernement
Japon	1979	40 636	27,4
États-Unis	1979	118 962	49,3
République fédérale d'Allemagne	1978	31 851	46,7
France	1979	22 407	58,4
Royaume-Uni	1979	13 130	49,2

Source : American Ceramics Society.

6.4.3 Coordination et gestion des programmes sur les néo-céramiques par le gouvernement - Rôle du ministère du Commerce international et de l'Industrie (MCII)

Les efforts déployés au Japon dans le secteur des néo-céramiques sont le résultat d'initiatives prises tant par le gouvernement que par l'industrie privée. Les politiques d'unité administrative et les dispositifs institutionnels qui coordonnent et dirigent ces efforts sont à l'image des relations de travail étroites qui existent entre le gouvernement japonais et le monde des affaires. Elles font aussi ressortir la capacité des entreprises japonaises de se faire une concurrence vigoureuse, d'une façon constructive, pour l'économie nationale.

Le ministère du Commerce international et de l'industrie (MCCI) est probablement le plus connu des ministères de ce genre au monde. Il détermine les domaines technologiques qui doivent être étudiés en profondeur, à long terme, dans l'intérêt du pays (une responsabilité appelée " vision ") et favorise ou aide financièrement la recherche et le développement dans ces domaines à un degré plus ou moins restreint. En plus de mettre sur pied des programmes de support dans les laboratoires gouvernementaux, le ministère vient en aide aux travaux de recherche et de développement entrepris par l'industrie. Cette aide du gouvernement est considérée par l'industrie comme de " l'argent de semence ". L'industrie investit une grande portion des fonds requis pour mettre au point et commercialiser les produits. On estime entre 10 et 20 contre 1, le rapport entre l'argent investi par l'industrie et le gouvernement.

MCII a récemment ouvert un " bureau des céramiques fines " pour administrer les programmes et favoriser le progrès des néo-céramiques.

Dans le but d'aider les industries des néo-céramiques et d'accélérer leur croissance, MCII songe à mettre en œuvre un certain nombre de programmes, particulièrement à cause de la participation des compagnies de taille moyenne ou petite. Les objectifs poursuivis dans ces programmes seraient :

TABLEAU 24

- Bureau du Premier ministre
  - Agence de la science et de la technologie
    - Institut national de recherche sur les matériaux inorganiques
    - - - Société japonaise pour le développement des recherches (JRDC)
      - Agence japonaise de recherches pour les techniques de pointe
  - Conseil des sciences du Japon
  - Conseil pour la science et la technologie

- Ministère du Commerce international et de l'Industrie
  - Bureau des industries des biens de consommation
    - Bureau des céramiques fines — Planification et avancement de projets touchant la technologie de base dans le secteur des céramiques avancées; promotion des activités de R et D par l'industrie des céramiques.
  - Agence des sciences et de la technologie industrielles
    - Administration centrale
      - Secteur de la coordination générale
        - Bureau de la technologie industrielle — Projets de R et D portant sur la technologie de base dans les secteurs suivants : céramiques de haute performance, métaux synthétiques, matériaux composites, etc.
        - Agent principal du Programme de développement — Développement de techniques de conservation de l'énergie : projet moonlight (turbines à gaz évoluées, génération magnéto-hydrodynamique, nouveaux types d'accumulateurs).
        - Division de la promotion de la technologie — Services de soutien de R et D aux industries du secteur privé sous formes de prêts sous condition, de dégrèvements et de prêts du gouvernement.
      - Secteur des normes
        - Division des normes chimiques et textiles — Normes industrielles pour les céramiques, les textiles chimiques, les produits de première nécessité, les emballages.
    - Laboratoires et instituts de recherches — Projets de R et D comprenant les projets sur les techniques de pointe.
      - Laboratoire de génie mécanique
      - Laboratoire national de chimie pour l'industrie
      - Institut gouvernemental de recherches industrielles d'Osaka
      - Institut gouvernemental de recherches industrielles de Nagoya
      - Institut gouvernemental de recherches industrielles de Kyushu

- Ministère de l'Éducation
  - - - Universités nationales, municipales et privées
  - - - Société japonaise pour la promotion de la science

- Agence de la défense
  - Académie de défense
  - Institut de recherche et de développement techniques

——— Relation directe

- - - - Relation indirecte

Le gouvernement du Japon et la céramique

- une plus grande normalisation et une meilleure efficacité dans l'évaluation des matériaux;
- l'établissement d'un système pour favoriser l'échange de renseignements;
- l'établissement d'un centre expérimental pour les néo-céramiques;
- la préparation de données statistiques;
- l'accroissement de la prise de conscience et des connaissances du public;
- la formation nouvelle donnée aux ingénieurs et aux scientifiques déjà engagés dans le domaine des céramiques.

L'industrie japonaise est d'accord avec l'importance des néo-céramiques qu'a démontrée le MCII, comme l'indiquent les résultats d'une enquête effectuée auprès des directeurs de division de 100 des plus importantes compagnies japonaises destinée à déterminer les 10 innovations technologiques les plus importantes depuis la " crise du pétrole " de 1973. Les néo-céramiques occupent le cinquième rang dans cette liste, ce qui est une preuve convaincante que beaucoup de gens croient en l'importance de ce secteur, étant donné que les résultats de l'enquête représentent l'avis commun des directeurs techniques dans plusieurs domaines et dans de nombreuses industries qui ne manifestent pas encore d'intérêt dominant pour les néo-céramiques.

En plus de financer les activités de recherche et de développement dans l'industrie, le MCII a aussi pris un certain nombre d'initiatives pour favoriser le progrès de l'industrie des néo-céramiques au Japon et commercialiser ses produits. Deux des initiatives importantes à cette fin sont :

- la promotion de la création d'associations industrielles de recherche et développement;
- la promotion de programmes de prise de sensibilisation du public.

Associations industrielles de recherche et de développement

Jusqu'ici, le MCII a participé à la formation de trois associations industrielles qui contribuent fortement au progrès et à la commercialisation des néo-céramiques.

Groupe de discussion sur les néo-céramiques

Ce groupe, établi en 1972, comprend 197 membres industriels et est dirigé par le professeur Mitsue Koizumi, directeur de l'Institut de la recherche scientifique et industrielle à l'université d'Osaka. Le groupe tient des réunions et des colloques sur les néo-céramiques et administre le projet du ministère de l'Éducation, de la Science et de la Culture concernant les " recherches nouvelles sur les céramiques fonctionnelles ".

Classement des dix innovations technologiques les plus importantes depuis 1973

Innovations	Nombre de réponses (nombre de directeurs donnant le premier rang à cette innovation)	Classement
1. Applications d'intégration à grande échelle	86 (67)	397
2. Biotechnologie	41 (5)	151
3. Fibres optiques	39 (4)	129
4. Robots industriels	35 (7)	104
5. Néo-céramiques	42 (0)	103
6. Interféron	31 (0)	86
7. Bureautique	23 (8)	77
8. Autres matériaux nouveaux	21 (0)	41
9. Super-ordinateurs	11 (2)	37
10. Technologie spatiale	14 (1)	32

Source : Le journal économique industriel Nikkei Sangyo Shimbun, 16 août 1983.

Association de recherches techniques sur les céramiques de haute performance

Cette association a été créée en 1981 pour contrôler les projets de recherche subventionnés par le MCII et exécutés par 15 entreprises industrielles et 4 instituts de recherches gouvernementaux. Ses bureaux sont à Tokyo. Le tableau 25 présente la liste des membres de cette association.

Association des céramiques fines du Japon

Cette association a été établie en juillet 1982 pour favoriser la participation d'entreprises industrielles qui n'étaient pas auparavant intéressées directement aux céramiques aussi bien que pour mettre au point les besoins des industries de néo-céramiques. Cette association a ses bureaux à Tokyo et elle favorise et coordonne les activités industrielles dans le secteur des néo-céramiques. Elle compte parmi ses membres 172 compagnies : 158 membres ordinaires payant 1 600 $ par an et 14 membres coopératifs, 800 $ par an. Le tableau 26 indique comment se répartissent les membres par type de compagnie. L'association joue le rôle d'un lieu de rencontre pour regrouper et harmoniser les besoins des compagnies de céramique et des usagers par des échanges de renseignements. Il est évident que la grande majorité des membres proviennent de différents secteurs de l'industrie.

TABLEAU 25

Membres de l'Association de recherches techniques sur les céramiques de haute performance

Membres	Secteurs de recherche attribués
Toshiba Corporation	Frittage du nitrure de silicium
Kyocera, Ltd.	Optimisation du procédé de frittage
Asahi Glass	Façonnage et frittage des céramiques de carbure de silicium
NGK Spark Plug	Frittage du nitrure de silicium en deux temps
NGK Insulators	Mise au point d'une technologie d'évaluation technique
Showa Denko K.K.	Fabrication du carbure de silicium
Denki Kagaku Kogyo K.K.	Fabrication du nitrure de silicium à partir de poudres de silicium ou d'halogénures de silicium
Toyota Machine Works	Appareillage pour mesurer la résistance à la flexion à haute température
Kobe Steel	Frittage du nitrure de silicium par traitement isostatique à chaud
Toyota Motors	Mesure de la résistance à haute température
Inoue Japax	Usinage et fabrication
Sumitomo Electro-Chemical	Minimisation de la distribution de la taille des grains
Kurozaki Refractories	Essais de corrosion
Shinagawa Refractories	Mise à l'épreuve de la fatigue thermique
Ishikawajima Harima Heavy Industries	Conception de pièces mécaniques

Nota : Les laboratoires nationaux qui font partie de l'association sont : l'Institut gouvernemental de recherches industrielles, Nagoya; le laboratoire de génie mécanique; l'Institut gouvernemental de recherches, Osaka et l'Institut national pour la recherche sur les matériaux inorganiques. La durée initiale est de 10 ans (3 ans pour la recherche fondamentale, 3 ans pour la mise au point du modèle et 4 ans pour la production et l'évaluation). Le financement est de 13 milliards de yens ou environ 57 millions de dollars.

Programmes destinés à susciter l'intérêt public

Faire augmenter l'intérêt public envers les avantages des néo-céramiques et les bénéfices qu'on peut retirer de leur utilisation constitue un aspect important de la stratégie du Japon pour faire accepter les néo-céramiques par le public. Le public est conscient que l'acier, les plastiques et le verre sont des matériaux largement utilisés dans de nombreuses applications techniques. Le MCII parraine la " Foire des céramiques fines " qui se tient tous les ans à Nagoya. En 1985, 147 compagnies représentant tous les aspects des néo-céramiques, depuis les matières premières jusqu'au traitement, aux applications et aux utilisations, ont participé à cette foire. La foire a été bien reçue par le public surtout parce qu'on utilise maintenant les néo-céramiques pour fabriquer des biens de consommation comme des ciseaux, des couteaux, des bâtons de golf et des patins à glace.

6.4.4 Examen des programmes du MCII concernant les néo-céramiques

L'Agence de la science et de la technique industrielles (AIST), une des trois agences du MCII, est responsable de l'établissement et de l'exécution des politiques et des programmes nécessaires à la mise au point des néo-céramiques. Ces activités sont présentement le fait du " Bureau des céramiques fines ". L'AIST a mis en marche trois importants programmes nationaux qui sont bien connus aujourd'hui :

° Le programme Sunshine lancé en 1974.
° Le programme Moonlight lancé en 1978.
° Le programme de mise au point des technologies de base industrielles lancé en 1981.

La figure 26 présente les objectifs de ces programmes dont les néo-céramiques constituent un élément.

Le projet Sunshine ne comportait aucune activité directement rattachée aux céramiques. Cependant, il est bien évident, d'après la façon dont s'est déroulé le programme au cours des premières années (1974 - 1977), qu'on s'est rendu compte de la nécessité de disposer de céramiques à haute température et à rendement élevé. C'est pourquoi, au lancement du programme Moonlight en 1978, on a incorporé certaines sections ayant trait à la mise au point d'éléments de céramique.

Alors que l'objectif du programme Sunshine était de mettre au point de nouvelles sources d'énergie pour remplacer le pétrole brut, le programme Moonlight avait pour but d'élaborer des technologies de conservation de l'énergie. Comme l'indique la figure 26, on a choisi cinq secteurs d'activités :

° Turbines à gaz évoluées
° Technologie de l'utilisation de la chaleur perdue
° Génération magnéto-hydrodynamique

TABLEAU 26

Classification des types de compagnies qui font partie de l'Association des céramiques fines du Japon

Type de compagnie	Nombre
Céramiques	41
Produits chimiques	32
Accessoires électriques	25
Acier et métaux non ferreux	23
Machinerie	23
Automobiles	7
Industrie lourde, ingénierie	7
Autres	14
Total	172

- ° Nouveaux types d'accumulateurs et systèmes de stockage de l'énergie
- ° Cellules à combustibles

On estime que les activités de l'ensemble du programme " Moonlight " ayant trait aux céramiques coûteront environ un million de dollars par année, soit un coût total de 7 millions de dollars pour la durée entière du projet (7 ans).

Dans le cadre du programme des turbines à gaz évoluées, on a mis au point des aubes de turbine et des chambres de combustion en céramique. Les essais pratiques sur ces éléments ont été exécutés par l'Association de recherches techniques sur les turbines à gaz évoluées (AGTERA) qui est un groupement de laboratoires de l'industrie privée et du gouvernement. En plus des laboratoires du gouvernement, l'Association comprend aussi les membres industriels suivants : Mitsubishi, Toshiba, Kawasaki, Hitachi et Ishikawajima.

Le programme de mise au point des technologies industrielles de base, lancé en 1981, se penche sur trois domaines : les nouveaux matériaux, la biotechnologie et les nouvelles unités fonctionnelles. Dans le secteur des nouveaux matériaux, on a choisi la mise au point de quatre catégories de matériaux, dont les néo-céramiques. L'Association des recherches techniques sur les matériaux à rendement élevé assure la coordination du programme en ce qui a trait aux néo-céramiques. Le tableau 27 présente les objectifs de rendement des matériaux céramiques alors que la figure 27 établit les périodes de référence prévues pour l'exécution des tâches principales.

6.4.5 Activités industrielles dans le secteur des néo-céramiques

L'industrie céramique japonaise est maintenant bien établie tant par la diversité de ses produits que par ses capacités technologiques lui permettant de continuer à mettre au point et à fabriquer des néo-céramiques. Ces produits comprennent des éléments céramiques techniques (éléments de moteurs, pièces résistant à l'usure) et des céramiques fonctionnelles (éléments électriques et électroniques, détecteurs et biocéramiques).

Le tableau 28 indique la taille relative de l'industrie céramique au Japon. On y découvre qu'il y a en tout 33 323 compagnies employant 530 466 personnes. On voit par là que l'industrie céramique du Japon représente une partie importante de l'économie du pays. Cependant, à l'intérieur de ce groupe, le nombre des compagnies qui participent à des activités ayant trait aux néo-céramiques est très faible. Il est bien probable, cependant, qu'avec la diffusion plus considérable de la technologie, le nombre de ces compagnies s'accroisse dans les années à venir. Le tableau 29 indique le nombre de chercheurs à l'emploi de l'industrie de la céramique comparativement aux autres secteurs

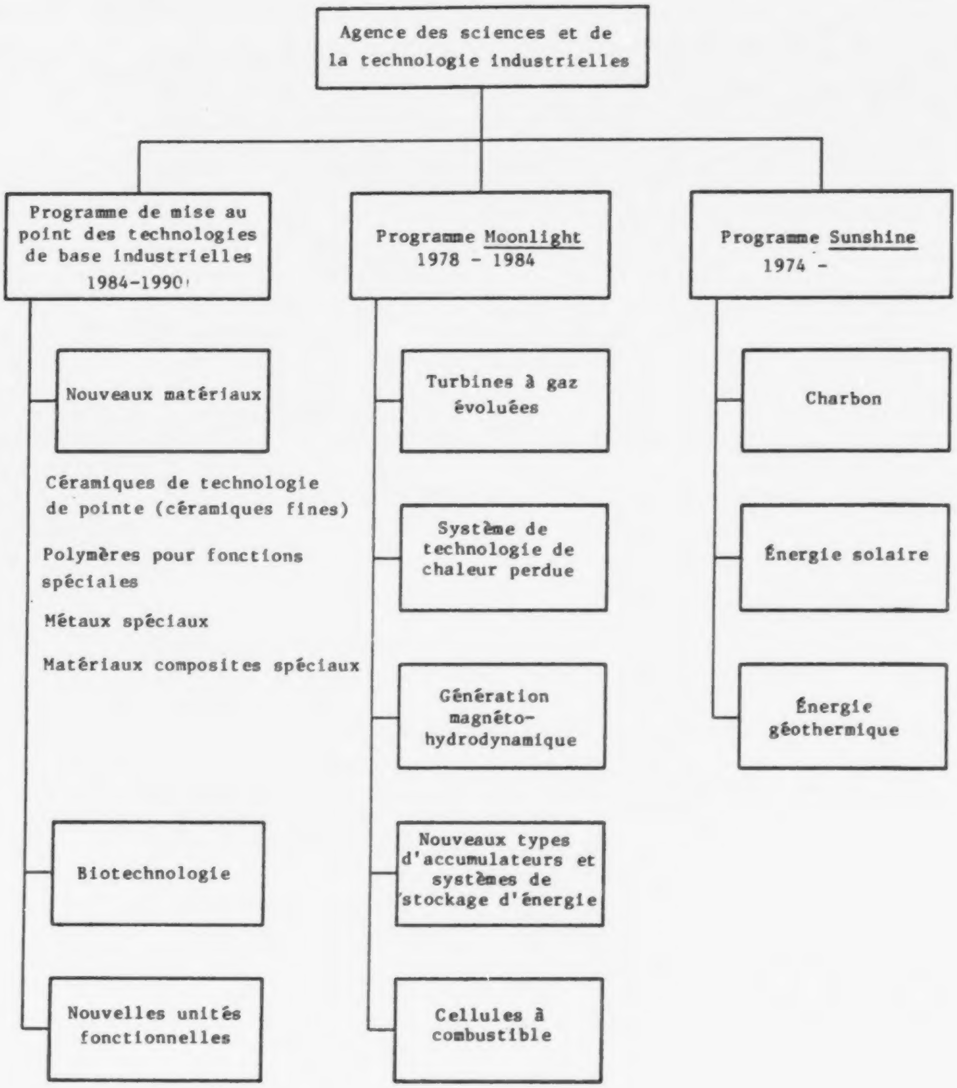


FIGURE 26 : Programmes de néo-céramiques parrainés par le MCII.

TABLEAU 27

Objectifs de rendement du programme de céramiques de technologie de pointe du MCII

Classification	Objectifs	Valeurs
Matériaux à grande résistance	⩾1200°C dans l'air après 1000 heures de retenue :	
	Module Weibull	$M \geq 20$
	Résistance moyenne à la traction	$\bar{\sigma} \geq 30$ kg/mm^2
	1200°C dans l'air après 1000 heures de chargement continu :	
	Résistance de rupture au fluage	$\bar{\sigma} \geq 10$ kg/mm^2
Matériaux résistant à la corrosion	⩾1300°C dans l'air après 1000 heures de retenue :	
	Module Weibull	$M \geq 20$
	Résistance à la corrosion (gain de poids)	≤ 1 mg/cm^2
	Résistance moyenne à la traction	$\bar{\sigma} \geq 20$ kg/mm^2
Matériaux résistant à l'usure	Température de la pièce	
	Résistance à l'usure	$\leq 10^{-4}$ mm^3/kg-mm
	Planéité superficielle	$R \leq 2$ um
	800°C dans l'air après 1000 heures de retenue :	
	Module Weibull	$M \geq 22$
	Résistance moyenne à la traction	$\bar{\sigma} \geq 50$ kg/mm^2

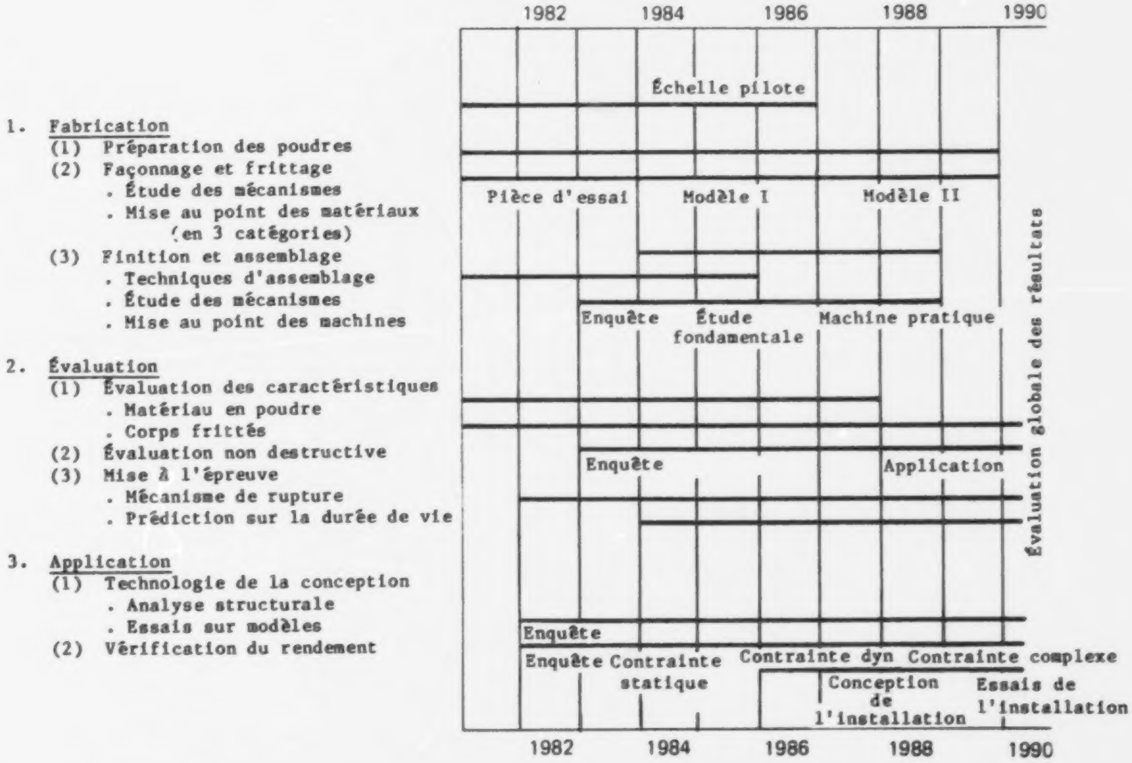


FIGURE 27 : Calendrier du programme de développement du MCII.

industriels. Il y en avait 4 799 en 1981, et on croit que ce nombre est beaucoup plus considérable aujourd'hui. Une estimation veut qu'il y ait 2 000 scientifiques dans le seul secteur des néo-céramiques.

Parce qu'elles se sont rendu compte que les néo-céramiques semblent offrir un excellent potentiel commercial à moyen et à plus long terme, un grand nombre de compagnies diverses sont entrées dans ce champ d'activités ou ont l'intention de le faire. Ces compagnies participeront à ce mouvement en tant que fabricants d'outillage céramique ou de bureaux d'études, ou les deux ensemble. Il y a déjà environ 120 compagnies qui vendent des néo-céramiques d'un type ou l'autre, près de 40 qui fournissent des matières premières et 50 qui vendent de l'outillage pour la fabrication ou le traitement des néo-céramiques. Environ 60 compagnies engagées dans la fabrication des néo-céramiques sont inscrites à la Bourse. Deux tiers de ces compagnies sont venues à ce secteur par le biais de l'industrie des matériaux, et un tiers d'entre elles sont entrées en affaires dans l'industrie du traitement et de l'assemblage. Le tableau 30 présente une liste des plus importantes entreprises japonaises engagées dans la mise au point et la commercialisation des néo-céramiques.

Il y a trois raisons importantes qui poussent les compagnies à entrer dans le marché des néo-céramiques, à savoir :

° la diversification, par les fabricants de matériaux désireux d'appliquer la technologie existante pour obtenir une valeur ajoutée supérieure et créer des produits plus avantageux;

° l'amélioration d'une technologie existante. Ceci s'applique aux fabricants actuels de céramiques;

° la participation, par les industries de transformation et de montage, ce qui force les usagers des matériaux à mettre au point eux-mêmes de nouveaux matériaux.

Le tableau 31 présente en résumé les raisons qui poussent les divers secteurs de l'industrie à se lancer dans le domaine des néo-céramiques.

6.4.6 Participation des universités au développement des néo-céramiques

Les universités participent de deux façons au progrès des néo-céramiques : tout d'abord, par la formation d'ingénieurs et de scientifiques spécialisés en céramique pour répondre aux besoins de l'industrie, du gouvernement et des universités elles-mêmes; deuxièmement, par une participation active à la recherche et au développement des néo-céramiques, avec l'aide financière du gouvernement et de l'industrie, dans le but de se conformer aux objectifs nationaux.

TABLEAU 28

Importance relative de l'industrie céramique au Japon

Industries	(a) Nombre de compagnies	(b) Nombre d'employés	(b)/(a)	(c) Valeurs des expéditions
Toutes les industries				$ x 10^9 +
1-9 personnes	563 803	2 159 056	3,8	58
10-29 personnes	121 298	2 062 144	17,0	103
30-99 personnes	40 417	2 103 728	52,1	140
100-999 personnes	13 146	3 085 015	234,7	328
1000 ou plus	640	1 449 919	2 265,5	207
Total	739 304	10 859 862	14,7	836
Fabricants de céramiques : produits de pierre, d'argile, de verre				
1-9 personnes	22 069	90 695	4,1	2,5
10-29 personnes	7 704	137 022	17,8	8,9
30-99 personnes	2 902	145 534	50,1	8,3
100-999 personnes	632	135 541	214,5	11,3
1000 ou plus	16	21 674	1 354,6	2,0
Total	33 323	530 466	15,9	33,0

* Source : Recensement des fabricants, 1979, MCII

+ On adopte 220 yens = 1 dollar US.

TABLEAU 29

Nombre de chercheurs par gamme de produits au Japon

	Année				
	1977	1978	1979	1980	1981
Toutes les industries	151 437	153 706	157 279	173 244	184 889
Industries de fabrication	141 839	144 018	148 250	163 867	175 088
Textiles	2 245	1 725	2 080	3 846	2 371
Pâtes et papiers	1 235	1 254	1 448	1 355	1 527
Chimiques	28 259	29 228	29 506	31 556	32 847
Produits (pétrole et charbon)	1 101	1 273	1 274	1 316	2 363
Produits de caoutchouc	2 230	2 598	2 830	3 180	3 423
Céramiques	4 004	3 894	3 652	5 355	4 799
Fer et acier	4 124	4 176	4 305	4 434	4 800
Métaux non ferreux	2 130	2 186	2 403	2 385	2 895
Machinerie	13 426	14 375	12 642	15 273	15 390
Machinerie électrique	49 465	47 939	51 174	55 467	58 873
Machinerie de transport	13 705	13 855	15 132	16 169	17 682
Machinerie de précision	4 590	4 935	5 685	6 188	7 061

* Sources : Rapports sur la situation de la recherche et du développement de 1973 à 1980 et grandes lignes de la situation de la recherche et du développement pour 1981.

TABLEAU 30

Compagnies japonaises engagées activement dans le secteur des néo-céramiques

Poudres chimiques métallurgiques	Éléments/pièces de néo-céramiques	Produits incorporant des néo-céramiques
Showa Dendo	TDK Electronic	Hitachi, Ltd.
Mitsubishi Chemical	Kyocera International	Matsushita Electric
Sumitamo Chemical	Murata	Toshiba Corp.
Ube Industries, Ltd.	Taiyo Yuden	Nippon Electric Co.
Nippon Soda Company Ltd.	Toshiba Ceramics	Fujitsu Limited
Mitsubishi Mining & Cement	Hitachi Metals	Mitsubishi Electric Corp.
Fuji Titanium	NGK-Spark plug	Sumitamo Electric Corp.
Toray Industries, Ltd.	NKG Insulator	Fuji Electric
Nippon Steel	Asahi Glass Co. Ltd.	
Nippon Carbon	Narumi China	
	Fuji Electrochemical	
	Nippon Tungsten	
	Sumitamo Specialty Metals	
	Tohoku Metal Industries	

Éléments électroniques	Outils coupants et pièces d'usure	Moteurs et pièces d'automobiles
Kyocera International	Nippon Tokushu Togyo	Kyocera International
Nippon Tokushu Togyo	Nippon Tungsten	Nippon Tokushi Togyo
Narumi China	Kyocera International	Nippon Denso
Nippon Gaishi	Sumitamo Electric Ind.	Nippon Shobubia
Tokoyo Denki Kagaxu	Mitsubiskh Metal	Kagoku Kogyo
Taiyo Yuden	Fujikin	Nippon Gaishi
Murata Manufacturing	Nippon Gasishi	
Tohoku Kinzoku Kogyo	Hitachi Chemical	
Unizon		
Matsushita Electrical Ind.		
Nippon Denso		
Nippon Kagaku Togyo		
Fuji Denki		
Chichibu Cement		
Sumitamo Electric Ind.		
Toray Industries, Inc.		

Source : Division de l'analyse industrielle, ministère du Commerce des États-Unis; détails provenant des listes publiées dans le Manuel du ministère du Commerce international et de l'Industrie (MCII), 1981-1982.

Le tableau 32 présente le nombre d'étudiants dans les cycles supérieurs et le nombre de détenteurs de diplômes (maîtrises et doctorats) au Japon, comparativement aux États-Unis, au Royaume-Uni, à la République fédérale d'Allemagne et à la France. On remarque immédiatement que le Japon rivalise avec les États-Unis en ce qui a trait au pourcentage des étudiants inscrits aux études supérieures, soit 37 % au Japon contre 45 % aux États-Unis. Ce pourcentage est bien supérieur à celui des pays européens. Il est particulièrement intéressant de remarquer la grande importance que prend la formation technique.

Le tableau 33 donne la liste des universités qui poursuivent activement des recherches sur les néo-céramiques.

TABLEAU 31

Motifs pour se lancer dans l'industrie des céramiques fines

Industrie	Motif pour se lancer dans l'industrie des céramiques fines.	Liaison technologique	Comparaison avec les entreprises actuelles ou raisons qui poussent à la décision de se lancer dans le champs des céramiques fines.	Direction future (exemple).
Céramique	Amélioration de la principale ligne d'affaires	Technologie de la calcination, technologie de la pulvérisation	Valeur ajoutée supérieure pour la principale ligne d'affaires.	Systématisation et fonctions plus avancées.
Produits chimiques, textiles	Diversification, amélioration d'un marché qui est à la baisse.	Une partie de la chimie inorganique (l'utilisation de composés inorganiques pour les céramiques fines).	Il est relativement facile pour cette industrie d'entrer dans le domaine des céramiques fines parce qu'elle est depuis longtemps en affaires dans un marché de produits (chimiques) de qualité.	Progrès d'un marché à la baisse par la production de matières premières plus fines.
Acier et métaux non ferreux	Pour la consommation propre de l'industrie, diversification.	Une accumulation de technologie en tant que producteur et usager de matériaux réfractaires et d'outils coupants.	On croit que le matériau existant (acier) ne sera jamais remplacé	Activité des filiales.
Industrie électrique	Poursuite de la fabrication de matériaux de pointe (marché à la hausse), (pour la consommation propre de l'industrie).	Utilisateur de céramiques fines comme matériaux électroniques; capacité d'évaluer les matériaux, bon jugement et technologie de traitement de précision comme utilisateur	Sans connaissance du marché en croissance (matériaux), il est impossible de faire progresser les affaires existantes; il faut concevoir des matériaux qui conviennent aux besoins recherchés.	Fabrication pour l'usage propre de l'industrie : travaux conjoints de recherche et de développement avec les fabricants des matériaux.
Machinerie	Amélioration des systèmes par l'introduction de nouveaux matériaux.	Le talent pour choisir les pièces et les matériaux les plus convenables.	L'amélioration des fonctions des détecteurs est essentielle.	Mise au point de divers types de matériaux de détection.
Automobiles	Économie d'énergie; introduction de pièces	Recherche depuis longtemps dans l'évaluation et l'utilisation des céramiques comme catalyseurs et comme matériaux (économisant l'énergie) pour les moteurs.	La recherche et le développement sont essentiels pour réaliser des moteurs plus légers et d'efficacité supérieure et pour découvrir de nouvelles sources d'énergie motrice.	Développement conjoint avec les fabricants des matériaux; mise au point de nouveaux concepts basés sur de nouveaux matériaux.
Industrie lourde et ingénierie	Nouveaux produits et systèmes améliorés par l'introduction de nouveaux matériaux	La capacité de concevoir de nouveaux matériaux.	Il y a plus d'ouvertures par l'extension des activités dans des secteurs d'affaires connexes.	Vers un système général des industries de céramiques fines (traitant d'affaires connexes).

Source : The Long-Term Credit Bank of Japan, Ltd.

TABLEAU 32

A - Nombre d'étudiants dans les cycles supérieurs et de titulaires de diplômes au Japon, aux États-Unis, au Royaume-Uni, en France et en République fédérale d'Allemagne

Pays	Année Budgétaire	Total	Sciences culturelles et sociales	Sciences physiques (%)	Génie (%)	Agriculture	Sciences médicales	Autres
		Nombre d'étudiants dans les cycles supérieurs						
Japon	1970	1 619 649	857 139	42 265 (2,6)	320 029 (19,8)	53 356	72 284	274 576
	1981	2 110 513	1 108 688	55 212 (2,6)	368 770 (17,5)	63 195	129 888	384 760
États-Unis	1970				231 700			
	1975	8 727 826			231 400 (2,7)			
	1981	9 403 049			387 600 (4,1)			
Grande-Bretagne	1970	185 872	81 167	45 775 (24,6)	30 261 (16,3)	3 640	20 616	4 413
	1979	245 093	113 157	55 590 (22,7)	35 817 (14,6)	5 124	27 629	7 726
France	1970	572 614	346 689		89 455 (15,6)		112 275	24 195
	1978	720 335	389 195		103 776 (14,4)		161 931	65 433
République fédérale d'Allemagne	1970	407 107	164 514	69 917 (17,2)	39 580 (9,7)	7 065	44 748	85 283
	1979	970 284	455 433	141 653 (14,6)	176 494 (18.2)	24 014	83 238	89 422

* Donnée non disponible ou non recueillie

Source : Kenchi Oshima, Science and Technology in Japan, in Journal of Japanese Trade and Industry, n°5, pages 21-23, 1983.

TABLEAU 32 (suite)

B - Nombre de diplômés, M.Sc. et de Ph.D.

Pays	Année Budgétaire	Total	Sciences culturelles et sociales	Sciences physiques (%)	Génie (%)	Agriculture	Sciences médicales	Autres
Japon	1970	13 879	2 847	1 794 (12,9)	4 633 (33,3)	1 026	3 219	360
	1981	21 665	4 124	2 532 (11,7)	8 161 (37,7)	1 695	4 234	919
États-Unis	1970	262 616	102 056	26 520 (10,1)	21 797 (8,3)	3 543	6 215	102 485
	1978	333 809	141 349	22 692 (6,8)	21 292 (6,4)	4 944	16 203	127 329
Grande-Bretagne	1970	12 901	4 183	4 017 (31,1)	2 727 (21,1)	320	835	819
	1978	18 080	6 322	4 374 (24,2)	3 090 (17,1)	501	1 206	2 587
France	1970	7 526	1 702		3 049 (40,5)		2 775	
	1977	17 273	2 421		5 178 (30,0)		9 674	
République fédérale d'Allemagne	1970	9 728	2 158	1 995 (20,5)	768 (7,9)	332	4 475	
	1979	11 033	2 279	2 467 (22,4)	982 (8,9)	469	4 827	

Source : Kenchi Oshima, Science and Technology in Japan, in Journal of Japanese Trade and Industry, n°5, 1983.

TABLEAU 33

Principales universités du Japon qui ont des programmes permanents de recherches en céramique

Universités	Domaine de R et D
Université d'Hokkidao	Poudres céramiques
Université de Keio	Poudres céramiques
Université de Kyoto	Propriétés du verre
Institut de technologie de Kyoto	Propriétés mécaniques
Université de Kyushu	Poudres, électrolytes solides
Université de Mie	Verre
Université de Meijyo	Poudres ultra-fines
Université de Nagoya	Nitrures, matériaux électroniques
Institut de technologie de de Nagoya	Électrodes solides
Académie de la Défense nationale	Matériaux électroniques
Université d'Osaka	Céramiques techniques
Université de Siekei	Poudres céramiques
Université de Sizuoka	Détecteurs de gaz
Université de Tohoku	Frittage, propriétés des fractures
Institut de technologie de Tokyo	Néo-céramiques
Université de Tokyo	Céramiques électroniques
Université de Yamanashi	Croissance des cristaux

7. PERSPECTIVES CANADIENNES

7.1 Généralités

La plus grande partie des renseignements recueillis dans cette étude sur les néo-céramiques permet de tirer quatre conclusions importantes qui affecteront et influenceront les bien-être économique et social du Canada. Les néo-céramiques offrent tout d'abord une occasion de croissance et de diversification aux industries existantes tant dans le secteur des céramiques que dans d'autres, et constituent un potentiel pour la création de nouvelles industries. Deuxièmement, elles ouvrent les portes vers la découverte de solutions à long terme des problèmes d'énergie et de ressources, particulièrement pour les industries canadiennes fondées sur les richesses naturelles dont les produits seront menacés ou sérieusement touchés par suite de la substitution des matériaux. Troisièmement, on s'attend à ce que les néo-céramiques jouent un rôle de support vital dans la création et la croissance d'industries de technologie de pointe dans les domaines de l'électronique, des ordinateurs, de l'informatique et des communications, de l'espace, de la robotique et de la biotechnologie. Quatrièmement, elles devraient participer fortement à l'amélioration de la productivité d'un certain nombre d'industries de fabrication.

La vraie question que le Canada d'aujourd'hui doit affronter en est une de direction et d'engagement. La question qui se pose n'est pas : " est-ce que le Canada devrait investir dans la mise au point d'une industrie de base des néo-céramiques? " La vraie question est plutôt : " est-ce que le Canada peut se permettre de **ne pas** faire d'investissements dans le développement et la croissance d'une industrie de base des néo-céramiques ? ". Il n'y a qu'une réponse à cette question : " le Canada ne peut pas se permettre de ne pas investir dans le développement et la croissance d'une industrie de base des néo-céramiques ".

Étant donné que certains pays, le Japon et les États-Unis en particulier, ont pris de l'avance sur le Canada dans la mise au point des néo-céramiques et, ce qui est plus important, qu'ils disposent d'une infrastructure industrielle plus considérable, tant en termes de production et de consommation que de main-d'oeuvre scientifique et technique et de centres de formation, le Canada devra déterminer quels sont les secteurs où il peut tirer meilleur avantage de ses atouts majeurs, tels : des frais d'énergie inférieurs, l'existence de matières premières et l'accès au vaste marché américain.

7.2 Profil de l'industrie céramique canadienne

7.2.1 Profil de l'industrie céramique traditionnelle

L'industrie céramique canadienne est plutôt petite si on la compare aux autres pays industrialisés, particulièrement les États-Unis et le Japon. La plupart des entreprises canadiennes fabriquent des produits céramiques traditionnels. On peut grouper les produits de ces compagnies en différentes catégories comme suit :

- Abrasifs
- Brique et tuile
- Tuyaux d'égout en argile
- Verre
- Émail-porcelaine
- Poterie et faïence fine
- Produits réfractaires

Selon la " Liste des opérateurs 6 ", publiée par le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources en 1975, il y avait en tout 185 usines de fabrication au Canada. Ce nombre est monté à 230 en 1978, la dernière année pour laquelle des renseignements sont disponibles. Le nombre total des compagnies est inférieur à ce chiffre, étant donné que certaines des compagnies ont plusieurs usines réparties en différents endroits du Canada.

La plupart des compagnies produisent de la brique, des tuiles et de la poterie. Il y a deux gros fabricants de verre plan : Ford Glass Ltd. et PPG (Canada); le premier fabrique le verre à Toronto et le second à Owen Sound. Il y a également deux gros producteurs de contenants en verre au Canada, soit Domglas et Consumers Glass. Ces deux entreprises sont des compagnies canadiennes qui possèdent un certain nombre d'usines de fabrication réparties à travers le Canada. La compagnie Fiberglas Canada est une filiale de la Owens-Corning Fiberglass Corporation aux États-Unis. Elle a un certain nombre d'usines de fabrication au Canada et est un important fournisseur d'isolation de fibre de verre.

Bien qu'un certain nombre de fabricants canadiens produisent du carbure de silicium, il est expédié aux États-Unis à l'état brut et y est transformé en produits finis. Tous les gros fabricants de produits réfractaires sont des filiales de sociétés américaines.

7.3 Profil de l'industrie canadienne des néo-céramiques

7.3.1 Généralités

Comme les diverses applications des néo-céramiques touchent à un grand nombre de secteurs industriels, il est difficile de déterminer l'importance totale de leur pénétration dans le marché. Certains de ces matériaux sont si nouveaux qu'on n'a pas encore déterminé de catégories de données spécifiques - distinctes de celles des autres matériaux ou

produits destinés à d'autres types d'utilisations - pour donner une image de leur contribution à la base des données industrielles globales. On a abordé ces questions aux État-Unis comme au Japon, et il est probable que dans un avenir rapproché, on améliorera les méthodes de cueillette des données statistiques pour donner une meilleure idée de l'impact des néo-céramiques sur le marché. Il sera nécessaire d'adopter ces méthodes même au Canada.

Il est facile de déterminer quels sont les fabricants primaires de néo-céramiques et les fournisseurs de matières premières (poudres céramiques). Par contre, il est plutôt difficile de retracer tous les utilisateurs. On utilise les néo-céramiques de deux façons. Elles servent tout d'abord d'éléments finis entrant dans la fabrication des machines et de l'outillage industriel, comme éléments de moteurs, outils coupants, pièces d'usure, etc. On peut aussi les utiliser comme produits secondaires pour la fabrication d'autres éléments ou systèmes, par exemple comme substrats pour les composants électroniques, matériaux pelliculaires minces ou épais pour la fabrication d'éléments actifs ou passifs sur les substrats, détecteurs, capteurs, etc. Dans toutes ces applications, on poursuit encore davantage le traitement des néo-céramiques de base pour obtenir le résultat final désiré et en faire une partie du système pour le type d'utilisation recherché.

Le nombre de fabricants primaires de néo-céramiques au Canada est très faible. On croit, par contre, que le nombre de fabricants secondaires, c'est-à-dire ceux qui utilisent les néo-céramiques comme matériau de base pour le produit fini, est assez considérable. La présente étude a identifié tous les fabricants primaires canadiens connus de néo-céramiques. Les données concernant les fabricants secondaires sont incomplètes à cause de l'impossibilité d'obtenir des données des compagnies multinationales et des renseignements sur les importations.

7.3.2 Fabricants de poudres céramiques destinées aux néo-céramiques

Le tableau 34 présente une liste de fabricants de poudres céramiques destinées à l'industrie des néo-céramiques. Il n'y a présentement que quatre fabricants : Alcan, Northern Pigment Co., Cominco et Kennametal. Alcan fabrique et fournit depuis plusieurs décennies des poudres d'alumine destinées aux marchés canadien et américain. Northern Pigment Co., dont l'usine est à Toronto, est un fournisseur important d'oxydes de fer spécialisés utilisés pour la fabrication de ferrites dures ou tendres, qui sont des aimants céramiques; comme il n'y a aucune demande pour ces produits au Canada, ils sont exportés (en grande partie aux États-Unis). Cominco est un fournisseur de matériaux semi-conducteurs parmi lesquels l'arséniure de gallium (GaAs), matériau très important utilisé comme substrat en électronique. La division Marco de Kennametal fabrique de la poudre de carbure de tungstène.

TABLEAU 34

Fabricants de poudres céramiques destinées aux néo-céramiques

Nom de la compagnie	Produits
Alcan Aluminum Limited Montréal (Québec)	Poudres d'alumine
*Electro Refractories and Abrasives Canada Ltd., 60, rue Notre-Dame Cap-de-la-Madeleine (Québec) G8T 4B7	Carbure de silicium
*The Exolon Company of Canada Ltd., B.P. 280 Thorold (Ontario) L2V 3Y9	Carbure de silicium
*General Abrasive (Canada) Ltd., 3807, avenue Stanley Niagara Falls (Ontario)	Carbure de silicium
*Norton Company of Canada, Limited B.P. 37 190, rue de Grandmont Québec (Québec) G8T 7W1	Carbure de silicium
*Norton Company of Canada, Limited 8001, rue Daly Niagara Falls (Ontario) L2G 6S2	Carbure de silicium
Northern Pigment Co., Toronto (Ontario)	Oxyde de fer pour ferrites dures et tendres
*Sohio Electrominerals Montréal (Québec)	Carbure de silicium
Kennametal Marco Div. Vancouver (Colombie-Britannique)	Carbure de tungstène
Cominco Trail (Colombie-Britannique)	

* En ce moment ces compagnies fabriquent du carbure de silicium brut au Canada et l'enrichissent aux États-Unis.

Ce tableau présente aussi la liste d'un certain nombre de fabricants canadiens de granules de carbure de silicium. Ces compagnies sont installées au Canada depuis plusieurs années. Jusqu'à maintenant, le carbure de silicium brut a été expédié aux États-Unis pour y être enrichi en vue de la fabrication de produits comme des abrasifs, des éléments chauffants et des matériaux réfractaires. En ce moment, la compagnie Carborundum de Niagara Falls (N.Y.), enrichit le carbure de silicium brut produit au Canada et l'utilise pour la mise au point et la fabrication d'éléments de céramique technique destinés aux moteurs ou à d'autres utilisations. La compagnie Norton utilise aussi du carbure de silicium fabriqué au Canada pour les mêmes fins. Aucune des autres compagnies n'est engagée dans la mis au point des néo-céramiques.

Étant donné que les éléments céramiques destinés aux moteurs et au autres utilisations de performance élevée n'en sont encore qu'à l'étape de la mise au point, la demande du marché est relativement faible. Si, par ailleurs, le marché accepte ces produits au cours des années à venir, la demande s'accroîtra, et on peut concevoir que l'enrichissement se fera au Canada pour deux raisons : la première est que l'énergie électrique y est bon marché; la deuxième, qu'il pourra être avantageux d'intégrer dans une même usine les procédés d'enrichissement et de fabrication. Il est encore trop tôt pour prédire les tendances futures du marché, mais s'il y a une meilleure intégration des marchés nord-américains et que les gouvernements recourent à des stimulants convenables, la chose est très possible.

7.3.3 Fabricants de céramiques et d'éléments électroniques

Le tableau 35 dresse la liste des fabricants de céramiques et d'éléments électroniques. On y voit rapidement que le nombre de compagnies est restreint et que les types de matériaux sont peu nombreux.

Trois compagnies se sont consacrées à la fabrication des céramiques piézo-électriques : Almax Industries (1980) Ltd., de Lindsay (Ontario), Lakeside Electronics Ltd, de Whitby (Ontario), et BM Hi-Tech Inc., de Collingwood (Ontario). Une de ces compagnies, Almax, est la plus ancienne et la plus importante; elle compte environ 60 employés et exporte la plupart de ses produits aux États-Unis. En plus des céramiques piézo-électriques, Almax a diversifié sa production en y ajoutant des conducteurs ioniques pour des accumulateurs au soufre-sodium et pour utilisation dans des génératrices thermoélectriques au sodium. Plus récemment, la compagnie a acquis sous brevet, de France, la technologie de la fabrication des fours à haute température et de Lucas-Cookson, la technologie de production des sialons.

Lakeside Electronics est le deuxième plus gros fabricant de céramiques électroniques avec un personnel de 10 personnes à plein temps. La compagnie a commencé ses activités en 1969 et elle fabrique aussi des encres conductrices à couche épaisse utilisées dans la fabrication des microcircuits hybrides. Elle écoule environ 60 % de ses produits aux États-Unis et 40 % au Canada.

BM Hi-Tech Inc. est une compagnie relativement nouvelle lancée en 1983 comme filiale de la Blue Mountain Pottery de Collingwood (Ontario). Son personnel actuel ne comprend que 5 personnes, et elle fabrique des matériaux piézo-électriques spécialisés de même que des détecteurs et des transducteurs.

Murata Erie North America Limited, situé à Trenton, est le plus gros fabricant d'éléments céramiques électroniques au Canada; son personnel est d'environ 900 employés et la compagnie fabrique une gamme complète de produits électroniques. Elle dispose aussi d'un centre de contrôle de la qualité à Toronto pour assurer le suivi de toutes ses activités en Amérique du Nord. C'est une filiale en propriété exclusive de Murata, au Japon.

IBM Canada Limitée de Bromont, a installé une usine employant environ 1 400 employés pour la fabrication de substrats d'alumine et de microcircuits multicouches. Toute la production de l'usine est destinée à la gamme des produits IBM.

Magna International, une compagnie canadienne multimillionnaire dans le domaine des pièces d'auto, a lancé sous le nom de Powerplex Technology Inc., une entreprise en participation avec Brown Boveri de la République fédérale d''Allemagne. L'entreprise prévoit la fabrication d'accumulateurs sodium-soufre à densité d'énergie élevée pour les automobiles et autres utilisations. La technologie des séparateurs d'accumulateurs en alumine-bêta est bien établie à la compagnie Brown Boveri en République fédérale d'Allemagne et elle jouera un rôle important dans les activités de la compagnie Powerplex au Canada. La compagnie compte actuellement 13 employés pour ses activités présentes et on s'attend à ce que ce nombre augmente pour répondre aux besoins.

Neosid (Canada) Limited, une filiale en propriété exclusive d'une compagnie du Royaume-Uni, fabrique des éléments de ferrite tendre utilisés dans les appareils de radio d'automobiles et les appareils de télévision. La compagnie importe les poudres céramiques du Royaume-Uni et elle fabrique et fritte les éléments dans son usine de Toronto; elle emploie environ 30 personnes. C'est le seul fabricant de ferrites au Canada.

Northern Telecom et Canstar Communications fabriquent des fibres optiques, domaine important dans le marché de l'information et des communications. Northern Telecom fabrique depuis quelque temps des fibres optiques dans son usine de Saskatoon et les utilise dans ses réseaux. Canstar Communication, une filiale de Les Câbles Canada Limitée, dont l'usine est à Winnipeg, fabrique des câbles en fibres optiques à partir de fibres optiques importées. Cette compagnie fournit les câbles au réseau transcontinental de communications que le groupe CN-CP est en train de mettre en oeuvre.

TABLEAU 35

Compagnies fabriquant des néo-céramiques et
des éléments électroniques

Compagnies	Nombre d'employés	Produits
Almax Industries (1980) Ltd. 61, rue Needham Lindsay (Ontario) K9V 4Z7	60	Céramiques piézo-électriques Conducteurs ioniques Séparateurs d'accumulateurs
BM Hi-Tech Inc. Chemin Mountain Collingwood (Ontario)	4-5	Céramiques piézo-électriques Détecteurs, transducteurs
Canstar Communications Winnipeg (Manitoba)	S.O.	Câbles de fibres optiques
Circocraft Montréal (Québec)	S.O.	Circuits hybrides
Epitek Electronics 100, chemin Schneider Kanata (Ontario)	100	Circuits hybrides sur commande
IBM Canada Ltée Bromont (Québec)	1 400	Substrats d'alumine Éléments céramiques multi-couches
Lakeside Electronics Ltd. 473, cercle Hensall Whitby (Ontario) L1N 1B9	10	Céramiques piézo-électriques Pâtes à couche épaisse
Litton Systems Canada Ltd. 312, bd Rexdale Toronto (Ontario)	S.O.	Éléments céramiques sur mesure pour usage interne
Magna International Inc. 257, chemin Wildcat Downsview (Ontario) M3J 2S3	13-17	Séparateurs en alumine pour accumulateurs sodium-soufre (aussi un important fabricant de pièces d'automobiles)
Murata Erie North America Ltd. 6338, chemin Viscount Mississauga (Ontario) L4V 1H3 (Usine : Trenton, Ontario)	800	Grande variété d'éléments de céramique électronique

TABLEAU 35 (suite)

Compagnies fabriquant des néo-céramiques et des éléments électroniques

Compagnies	Nombre d'employés	Produits
Neosid (Canada) Limited 10, avenue Vansco Toronto (Ontario) M8Z 5Z4	30	Éléments magnétiques en ferrite tendre pour radios d'autos et télévisions
Northern Telecom Saskatoon (Saskatchewan)	S.O.	Fibres optiques pour utilisations en communications
Phillips Cables Ltd. Brockville (Ontario)	S.O.	Câbles de fibres optiques
Pirelli Cables Inc. Surrey (Colombie-Britannique)	S.O.	Câbles de fibres optiques

Un certain nombre de compagnies, qu'on estime entre 25 et 50, fabriquent des circuits électroniques hybrides à l'aide de substrats céramiques et de pâtes à couche épaisse pour produire des résistances, des condensateurs, des croisements diélectriques, etc. Presque toutes les compagnies électroniques dans le domaine des télécommunications recourent à cette technologie. On peut déterminer deux groupes de compagnies : les fabricants de circuits hybrides sur commande et les compagnies qui fabriquent des circuits hybrides pour les besoins de leurs propres gammes de produits. Epitek Electronics et Circocraft sont deux exemples typiques du premier groupe. L'usine d'Epitek Electronics est localisée à Kanata (Ontario); elle emploie 100 personnes et fabrique des circuits hybrides pour des compagnies qui ne sont pas équipées pour le faire mais qui en ont besoin pour les incorporer dans leurs gammes de produits. Circocraft de Montréal est une compagnie relativement nouvelle qui poursuit des activités semblables.

Un grand nombre de compagnies fabriquent elles-mêmes les circuits hybrides et les circuits multicouches dont elles ont besoin en partant de substrats en alumine et en utilisant une technologie de couche mince ou épaisse pour y incorporer des éléments conducteurs, actifs et passifs. On peut mentionner, parmi les plus importantes compagnies relevant de cette catégorie, les suivantes : Litton Systems Canada Ltd., Northern Telecom, Garrett Manufacturing Limited, Mitel Corporation, Canadian Marconi, CAE Electronics, Microtel.

7.3.4 Fabricants de néo-céramiques structurales et industrielles

Le tableau 36 présente la liste des compagnies qui fabriquent des néo-céramiques structurales et industrielles. Six de ces compagnies fabriquent un type ou l'autre de néo-céramiques ou de céramiques industrielles et au moins huit d'entre elles sont engagées dans la fabrication de revêtements de néo-céramique en se servant de la technologie des plasmas destinés soit à leurs besoins internes ou aux besoins des clients de l'industrie.

EYC Ceramics est une compagnie relativement nouvelle située à Espanola, en Ontario, et elle dessert les besoins de l'industrie minière et de l'industrie des pâtes et papiers. Elle emploie 7 personnes. Elle fabrique des éléments de céramique à base d'alumine et met actuellement au point des céramiques à base de zircone. En plus des céramiques qu'elle fabrique sur place, la compagnie importe aussi des États-Unis des éléments qu'elle est incapable de fabriquer elle-même par manque de technologie et de savoir faire. La compagnie cherche activement à étendre ses ressources technologiques de façon à mieux combler les besoins de l'industrie dans le nord de l'Ontario; elle aura toutefois besoin d'être aidée pour améliorer sa technologie, et pour créer et pénétrer les marchés.

Electrofuel Manufacturing Company est aussi une compagnie relativement nouvelle installée à Toronto. Elle emploie de 10 à 12 personnes. En

plus de la mise au point d'accumulateurs au lithium, elle a acquis une certaine capacité de fabrication dans le secteur des néo-céramiques. Elle a présentement mis au point la technologie pour la fabrication de céramique à base de nitrite de bore et en fait une mise en marché intense. Les points forts de la compagnie comprennent des activités technologiques de traitement des fibres évoluées visant à incorporer d'autres matériaux de néo-céramique, plus particulièrement des matériaux à base de nitrite de silicium. Comme il s'agit encore ici d'une nouvelle compagnie relativement petite, elle cherche de l'aide pour améliorer sa technologie et pour créer et pénétrer les marchés.

Hamilton Porcelains Limited de Brantford, en Ontario, est une compagnie bien établie qui fabrique des céramiques industrielles depuis près de trente ans. Elle compte présentement environ 120 employés et fabrique des produits céramiques à base d'alumino-silicates, de cordiérite et de zircone. Technologiquement parlant, la compagnie est très forte et elle a introduit un certain nombre de nouveaux produits au cours des années. Elle est d'ailleurs très connue pour ses brûleurs à infrarouge. Pour mieux s'engager dans la voie du marché des néo-céramiques, la compagnie a entrepris la mise au point de conducteurs ioniques pour les piles à combustibles et d'autres utilisations. La plus grande partie de ses produits sont exportés aux États-Unis, en Europe et au Japon.

La compagnie Home Technics Limited, est localisée à Peterborough, en Ontario, et elle compte environ 20 employés. Elle s'est spécialisée dans la fabrication de produits d'alumine à densité élevée dont la plupart sont exportés aux États-Unis où le marché les a acceptés pour certaines utilisations spécialisées. En ce moment la compagnie met au point des céramiques à base de zircone pour compléter ses gammes de produits. Elle a de fortes capacités technologiques et devrait être capable de participer davantage au développement de l'infrastructure industrielle des néo-céramiques au Canada. Toutefois, elle aura besoin d'aide pour améliorer sa technologie et pour créer et pénétrer les marchés.

La compagnie Industrial Ceramics Limited a ses installations à Cookesville, en Ontario, où elle emploie de 10 à 15 personnes et fabrique des produits de silicate d'alumine et de zircone; une grande partie de ses produits sont exportés.

La compagnie Polyceram est installée à Montréal et elle fabrique des produits de néo-céramique spéciaux à base d'oxydes céramiques. Elle utilise surtout des procédés de coulage en barbotine dont on peut se servir dans la fabrication d'un certain nombre de produits spécialisés. A cause de sa force technologique particulière, elle devrait être capable de participer à l'établissement de l'industrie des néo-céramiques au Canada. Comme c'est encore une petite compagnie, on suppose qu'elle aura besoin d'aide et de support pour améliorer sa technologie et pour créer et pénétrer les marchés.

TABLEAU 36

Compagnies fabriquant des néo-céramiques structurales et industrielles

Compagnies	Nombre d'employés	Produits
EYC Ceramics Boîte 250 Espanola (Ontario) POP 1CO	7	Céramiques d'alumine et de zircone
Electrofuel Manufacturing Co. 9, avenue Hanna Toronto (Ontario)	10	Céramique de nitrure de bore Séparateurs d'accumulateurs
Hamilton Porcelains Limited 25, rue Campbell Brantford (Ontario) N3T 5I9	100-120	Céramiques de mullite, cordiérite et silicate de zirconium conducteurs ioniques
Home Technics Limited 625-646, promenade Neal Peterborough (Ontario) K9J 7S4	20	Céramiques riches en alumine Céramiques de zircone
Industrial Ceramics Limited 473, cercle Hensall Cookesville (Ontario)	10-15	Céramiques d'alumine et de silicate de zirconium
Polyceram Montréal (Québec)	S.O.	Céramiques d'oxydes
Rolls Royce Montréal (Québec)	S.O.	Revêtements au plasma
Pratt & Whitney	S.O.	Revêtements au plasma
George A. Wright & Sons Ja-Division Kingston (Ontario)	S.O.	Revêtements au plasma
Peacock Inc. 1180, promenade Aerowood Cookesville (Ontario)	S.O.	Revêtements au plasma
Vacaro Montréal (Québec)	S.O.	Revêtements au plasma
Air Canada Montréal (Québec)	S.O.	Revêtements au plasma
CP Air Vancouver (C.-B.)	S.O.	Revêtements au plasma

Toutes les compagnies mentionnées ci-dessus fabriquent des éléments monolithes. Une autre technologie qui devrait prendre de plus en plus d'essor est celle de l'utilisation des néo-céramiques comme revêtement sur les métaux. Il existe plusieurs technologies de traitement, mais la plus utile est la technologie des plasmas. Comme les céramiques sont fragiles, les revêtements sont préférables aux céramiques monolithes dans certains cas, particulièrement là où on a utilisé et accepté les métaux à cause de leurs propriétés mécaniques. Metco est une des grandes compagnies qui fournissent l'outillage pour les plasmas aussi bien que les matériaux de néo-céramique et la technologie des revêtements. Il y a environ 30 unités de revêtement au plasma Metco au Canada et le tableau 36 présente la liste des usagers les plus importants de ce procédé.

Rolls-Royce et Pratt & Whitney, deux fabricants de moteurs d'avions, utilisent la technologie des plasmas pour le revêtement des éléments métalliques. Air Canada et CP Air possèdent des installations de technologie au plasma pour assurer le service et l'entretien des moteurs d'avions à réaction. George A. Wright & Sons, Peacock Inc. et Vacaro sont des compagnies qui font des revêtements sur commande pour assurer le service des industries d'aéronautique et de machinerie.

7.3.5 Fabricants d'outils coupants

Le tableau 37 présente la liste des compagnies qui fabriquent des outils coupants. Ce tableau indique clairement que la majorité des compagnies sont des filiales d'entreprises étrangères. Il y a néanmoins un certain nombre de compagnies canadiennes en activité qui pourraient se lancer avec succès dans la fabrication d'outils coupants pour la néo-céramique, au Canada.

La compagnie F & S Tool Corporation a son usine à Markham, en Ontario, et fabrique des outils coupants au diamant et au carbure. Elle emploie de 50 à 75 personnes.

La compagnie Galtwood Tools est située à Cambridge, en Ontario, et fabrique des outils coupants à bout tranchant d'acier et de carbure, surtout pour l'industrie du travail du bois. Elle emploie environ 50 personnes et a, au cours des années, mis au point un certain nombre d'outils. La compagnie connaît l'existence des outils coupants par la néo-céramique et pourrait en entreprendre l'étude et la fabrication dans un avenir plus ou moins rapproché.

La compagnie Graff Diamond Products Limited a son usine à Brampton, en Ontario et se spécialise dans la fabrication d'outils à base de diamant.

La compagnie International Cutting Tools Limited, de Montréal, est un grand fabricant canadien d'outils coupants. Elle a deux usines au Québec et une filiale en France (SENOCA). Elle emploie 200 personnes. Elle ne fabrique présentement que des outils d'acier à coupe rapide destinés principalement au marché aérospatial, ce qui ne l'empêche cependant pas d'étudier d'autres options et d'envisager la fabrication d'outils coupants pour la néo-céramique, à l'avenir.

La compagnie J.K.S. Boyles International Inc., est une filiale à propriété exclusive d'une entreprise américaine qui fabrique des outils coupants au diamant. Elle est localisée à Toronto et emploie de 50 à 75 personnes.

La compagnie Lamage est une filiale de J.K.S. Industries, compagnie rattachée à J.K.S. Boyle International. Cette compagnie est située à North Bay, en Ontario, et fabrique des outils coupants au diamant utilisés dans l'industrie minière.

La compagnie Kennametal Limited est une division canadienne de la compagnie américaine du même nom; elle a quatre usines au Canada. La compagnie fabrique différents types d'outils coupants à base de carbure avec revêtements CVD. Kennrock Tools, à Toronto, emploie environ 250 personnes et fabrique des outils coupants de forage dans le roc et de forage pour les puits de pétrole; ces outils sont à base de carbures et de nitrures d'aluminium. Kennametal, à Victoria, fabrique aussi des outils coupants au carbure. La division Marco, de Vancouver, fabrique des poudres de carbure de tungstène qui sont utilisées par les autres divisions de la compagnie pour la fabrication d'outils coupants. Les activités de recherche et de développement sont restreintes et ne requièrent les services que de six employés environ. La plus grande partie des travaux de recherche et de développement sont exécutés aux États-Unis. La compagnie Kennametal fabrique depuis quelque temps des outils coupants au sialon, aux États-Unis, sous brevet de Lucas-Cookson. Elle n'en fabrique pas encore au Canada.

La compagnie Sandvik Canada Corporation est une filiale à propriété exclusive de la compagnie suédoise Sandvik. Elle a deux usines de fabrication, une à Windsor fournissant des outils coupants à l'industrie de l'automobile, l'autre à Montréal qui dessert l'industrie minière. En Suède, Sandvik a obtenu, sous brevet de Lucas-Cookson, la technologie nécessaire à la fabrication des outils coupants au sialon. Il n'est pas question, dans l'optique actuelle, d'exporter la technologie des sialons au Canada, mais la compagnie sera peut-être intéressée à le faire, surtout si certains stimulants financiers l'y encouragent.

La compagnie Valenite Modco Limited, localisée à Windsor, en Ontario, est une filiale de la compagnie américaine du même nom. Elle emploie environ 200 personnes et fabrique des outils au carbure pour l'industrie automobile.

TABLEAU 37

Fabricants canadiens d'outils coupants

Compagnies	Nombre d'employés	Produits
F & S Tool Corp. Markham (Ontario)	50-75	Outils coupants au carbure et au diamant
Galtwood Tools Cambridge (Ontario)	50	Outils au carbure
Graff Diamond Products Ltd. 35, rue Hale Brampton (Ontario)	S.O.	Outils coupants au diamant
International Cutting Tools Montréal (Québec)	200	Outils d'acier à coupe rapide
*J.K.S. Boyles International Inc. 81, promenade Tycos Toronto (Ontario)	50-75	Outils coupants au diamant
*Lamage Filiale de J.K.S. Industries North Bay (Ontario)	S.O.	Outils coupants au diamant
*Kennametal Limited 1425, The Queensway Toronto (Ontario)	350	Outils au carbure de tungstène Outils à base à d'alumine Outils au sialon
*Kenrock Tools Inc. 3370, rue Dundas ouest Toronto (Ontario)	250	Outils au carbure de tungstène Outils à base d'alumine Outils au sialon
*Sandvik Canada Corp. 6835, promenade Century Mississauga (Ontario)	S.O.	Outils coupants au carbure
*Valenite Modco Limited Windsor (Ontario)	200	Outils coupants au carbure de tungstène et en céramique

*Compagnies de propriété étrangère

7.4 Programmes de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les laboratoires du gouvernement fédéral

Le tableau 38 présente une liste des laboratoires et organismes du gouvernement fédéral qui poursuivent ou appuient des programmes de recherche et de développement ayant trait aux néo-céramiques.

L'Atomic Energy Research Establishment à Pinawa, au Manitoba, s'est engagé, depuis un certain nombre d'années, dans la mise au point de verres résistant aux produits chimiques pour l'évacuation sécuritaire des résidus nucléaires. Bien qu'il s'agisse d'une application particulière de la technologie, on considère que la technologie qu'on est en train d'élaborer aura une portée beaucoup plus générale et devrait avoir une répercussion considérable sur d'autres utilisations.

Au centre de l'Énergie atomique du Canada, installé à Chalk River, l'on travaille actuellement sur les techniques de pointe de traitement de la céramique.

Le ministère de la Défense nationale a appuyé de façon fort active la mise au point des néo-céramiques dans certains domaines. Au cours des années, le Centre de recherches pour la défense/Ottawa de Shirley Bay, à Ottawa, a exécuté de nombreux travaux de recherche et développement tant dans ses laboratoires que par des programmes confiés à contrat à l'extérieur, dans un certain nombre de domaines. Parmi les programmes étudiés, on peut mentionner les suivants : joints d'étanchéité en verre-céramique-métal pour les accumulateurs et autres; céramiques pour les moteurs Diesel. Ce dernier programme est de date récente et reçoit de l'aide en sous-traitance de l'Ontario Research Foundation (ORF).

Le Centre de recherches pour la défense/Pacifique (DREP) à Victoria, en Colombie-Britannique, poursuit un certain nombre de programmes sur la mise au point de techniques de pointe non destructives à utiliser avec les néo-céramiques et les produits composites. Il a financé des programmes à l'ORF ainsi qu'à l'université McMaster; à cette université le programme est encore en cours.

Le Centre de recherches pour la défense/Atlantique (DREA), à Halifax, s'est intéressé aux néo-céramiques et à leur utilisation pour la défense. A la suite d'une étude approfondie, le Centre de recherches a lancé un certain nombre de programmes : évaluation de la stabilité des néo-céramiques utilisées dans les moteurs Diesel : utilisation de la technologie des néo-céramiques dans des applications de protection contre l'incendie; et mise au point des matériaux piézo-électriques de pointe pour utilisation dans les transducteurs. L'ORF participe aux deux premiers programmes alors que le troisième est exécuté par la compagnie BM Hi-Tech Inc.

TABLEAU 38

Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les laboratoires du gouvernement fédéral

Organisations	Activités
Centre de recherches sur l'énergie atomique Pinawa (Manitoba)	Déchets nucléaires
Énergie atomique du Canada Chalk River, Ontario	Traitement de la céramique
MINISTÈRE DE LA DÉFENSE NATIONALE	
Centre de recherches pour la défense, Shirley Bay Ottawa (Ontario)	Céramiques pour moteurs
Centre de recherches pour la défense/ Atlantique Halifax (Nouvelle-Écosse)	Céramiques pour moteurs Céramiques pour protection contre l'incendie Céramiques piézo-électriques
Centre de recherches pour la défense/ Pacifique Victoria (Colombie-Britannique)	Essais non destructifs Céramiques pour transducteurs
MINISTÈRE DES MINES, DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES	
Section de la céramique, CANMET	Céramiques diélectriques Céramiques pour la conversion de l'énergie Propriétés thermiques Traitement des céramiques
CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES	
Division de la chimie/Ottawa Ottawa	Semi-conducteurs Couches minces
Division de la physique/Ottawa Ottawa	Matériaux optiques Revêtements optiques
Division du génie mécanique, Ottawa, Vancouver	Tribologie Céramiques pour moteurs
Division du génie électrique Ottawa	Semi-conducteurs Couches minces

TABLEAU 38 (suite)

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES

Centre aéronautique national Ottawa	Matriçage isostatique à chaud Essais non destructifs Matériaux composites
Institut de recherches sur les matériaux industriels Boucherville (Québec)	Revêtements au plasma Essais non destructifs Technologie des utilisations Matériaux résistant à l'usure (WC) Revêtements semi-conducteurs Revêtements et détecteurs PZT.

On croit que l'intérêt que porte le ministère de la Défense nationale à la mise en valeur et à l'utilisation des néo-céramiques s'accroîtra à cause des progrès considérables réalisés par les États-Unis et les autres pays de l'OTAN dans ce domaine et de l'étroite collaboration qui existe entre ces pays en ce qui a trait à l'armement et aux systèmes de défense.

Le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources s'occupe activement de recherches en céramique depuis plus de 50 ans. Depuis plus de trente ans, la section de céramique de CANMET travaille à la mise au point de céramiques fonctionnelles dans ses laboratoires. Les travaux de " défrichement " sur les matériaux piézo-électriques à base de céramique de baryum exécutés durant les années cinquante ont déclenché la création d'industries de néo-céramiques au Canada, en particulier des compagnies Almax et Lakeside Electronics. Plus récemment, on a exécuté, dans le cadre du Programme énergétique national, des travaux importants dans un certain nombres de secteurs : les céramiques diélectriques; les conducteurs ioniques (les détecteurs d'oxygène à base de ZrO_2; les électrolytes céramiques à base d'alumine-bêta, NASICON, LISOCON, etc.) et les piles à combustible à hydrogène. Les laboratoires ont réalisé des progrès remarquables dans les domaines de la mise au point des matériaux et des procédés et dans l'évaluation des caractéristiques des matériaux. Le groupe de céramique qui comporte environ dix chercheurs a acquis une expérience et une compétence considérables et l'industrie canadienne des néo-céramiques devrait en tirer de grands avantages.

Le Conseil national de recherches Canada (CNRC) déploie lui aussi une grande activité dans certains secteurs des néo-céramiques. Un certain nombre de divisions du CNRC ont déjà exécuté ou continuent à poursuivre certains programmes qui relèvent du domaine des néo-céramiques, les plus importants étant les travaux de l'Institut de recherches sur les matériaux industriels, à Boucherville, au Québec.

La division de la chimie du CNRC, à Ottawa, comprend un groupe très actif d'environ six personnes travaillant sur les couches minces et les semi- conducteurs, un secteur qui a rapport aux néo-céramiques et constitue le point de départ pour une expansion de l'industrie électronique de pointe dans des utilisations comme l'informatique et les communications, les détecteurs, etc.

La division de l'énergie du CNRC, à Ottawa, a financé un certain nombre de programmes relatifs à la mise au point des néo-céramiques en vue d'utilisations ayant rapport à l'énergie. On peut mentionner à ce sujet les programmes suivants : mise au point de milieux de stockage thermique en néo-céramique (ces milieux ont constitué la base d'un système efficace de stockage de la chaleur en dehors des heures de pointe); matériaux néo-céramiques pour les collecteurs solaires; matériaux néo-céramiques et technologie pour le développement des " super fenêtres "; technologie de pointe de fibre de verre pour le stockage de

l'hydrogène; et séparateurs d'accumulateurs de pointe à base de nitrure de bore. Ces derniers sont devenus l'élément fondamental de nouvelles gammes de produits dont la compagnie Electrofuel Manufacturing, de Toronto, entreprend actuellement la mise au point.

La division de la physique s'est penchée activement pendant quelque temps sur les matériaux optiques, en particulier les revêtements. En fait, la division compte dans ses rangs une des équipes de chercheurs la plus reconnue à l'échelle internationale. Comme on pense que les détecteurs, l'opto-électronique et les filtres optiques seront appelés plus tard à jouer un rôle très important, une telle compétenue sera alors extrêmement utile.

La division du génie mécanique a consacré beaucoup d'efforts à la tribologie, c'est-à-dire à la science de l'usure et de la friction entre les matériaux. C'est là un secteur très important parce que certaines des applications commerciales les plus importants des néo-céramiques dépendent de leurs propriétés de résistance à l'usure. Ce qui a encore plus d'intérêt, c'est que la division est responsable de la recherche sur les moteurs et qu'elle dispose d'installations considérables pour en faire l'essai et l'homologation. C'est pourquoi cette division pourrait être appelée à jouer, à l'avenir, un rôle majeur dans l'utilisation des néo-céramiques dans les moteurs à combustion.

La section des structures et des matériaux du Centre aéronautique national possède une presse isostatique à chaud (modèle de laboratoire). De plus, cette section a acquis une grande expérience dans la détermination des propriétés des matériaux, plus particulièrement celle des matériaux composites. Elle s'est aussi activement intéressée aux essais non destructifs. Un des éléments clés de la commercialisation rapide des néo-céramiques structurales utilisées dans les moteurs est la mise au point de techniques d'essais non destructifs. Il semble bien que ce groupe pourrait offrir une contribution importante dans ce domaine.

L'Institut de recherches sur les matériaux industriels (IRMI) est une division du Conseil national de recherches du Canada qui se consacre à la mise au point des matériaux et à leur application à divers domaines.

Le personnel de l'Institut comprend 130 personnes réparties comme suit: matériaux plastiques : 40 %; métaux et matériaux composites : 30 %; revêtements et céramiques : 10 %; instrumentation et détecteurs : 17 % et administration : 3 %. L'Institut déploie de nombreuses activités dans certains secteurs ayant rapport aux néo-céramiques : mise au point de matériaux résistant à (à base de CW; revêtements au plasma à base de TiB_2 dans les cas exigeant de la résistance à l'usure; revêtements semi-conducteurs pour les électrolyseurs; fatigue thermique des matériaux réfractaires; revêtements PZT utilisant des techniques au plasma pour les détecteurs; et essais non destructifs, y compris

l'inspection thermo-optique et les techniques de microscopie acoustique. L'IRMI se trouve dans une situation qui lui permet d'étendre ses activités aux néo-céramiques et de répondre ainsi aux besoins du pays pour deux raisons : tout d'abord, l'Institut s'occupe déjà activement d'un certain nombre de questions ayant rapport aux néo-céramiques dans des domaines qu'il serait possible d'élargir facilement; et, deuxièmement, il a les capacités nécessaires, aussi bien en personnel qu'en outillage, particulièrement dans le moulage par injection des plastiques, pour pouvoir adapter la technologie du moulage par injection aux produits en néo-céramique.

On peut, en résumé, affirmer que les laboratoires du gouvernement fédéral possèdent une richesse en expérience, compétence et connaissances pourrait servir à créer un programme national sur les néo-céramiques, programme voué à la mise au point de travaux génériques de recherche et de développement de nature fondamentale, visant à combler les besoins de l'industrie canadienne, particulièrement, ceux des petites entreprises. Au Japon, aux États-Unis, en République fédérale d'Allemagne, au Royaume-Uni et en France, les installations et les capacités des laboratoires gouvernementaux servent à soutenir les programmes nationaux en aidant l'industrie. Ces pays ont déployé de l'activité dans la mise au point et la commercialisation des néo-céramiques depuis près de dix ans et y emploient plusieurs milliers de chercheurs. La seule façon pour le Canada de faire un grand bond en avant pour acquérir la technologie la plus avancée et faire une concurrence active sur les marchés internationaux est d'exploiter à fond les capacités et les installations des laboratoires gouvernementaux, en même temps que les compétences qui existent dans les universités, l'industrie et les agences de recherches provinciales.

7.5 Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les universités canadiennes

Le tableau 39 présente une liste des universités canadiennes qui exécutent des travaux ayant rapport aux néo-céramiques. Toutefois, seulement cinq universités comportent des groupes de travail assez importants dans ce domaine : l'université de la Colombie-Britannique, l'université McMaster, l'université de Toronto, l'université Queen's et l'université technique de Nouvelle-Écosse.

Le programme des céramiques de l'université de la Colombie-Britannique a été entrepris dans le département du génie métallurgique dès 1959, quand le professeur A.C.D. Chalklader devint membre de ce département. Au cours des 25 dernières années, le département a contribué de façon marquée tant à la formation d'ingénieurs en céramique qu'à la poursuite de programmes de recherche et de développement dans un certain nombre de secteurs. Le professeur Chalklader a acquis une réputation internationale pour ses travaux sur les céramiques particulièrement en ce qui a trait au frittage, au matriçage à chaud et aux propriétés physiques de ces matériaux. Le chef du département,

le professeur J.S. Nadeau, est aussi un scientifique d'envergure internationale qui a établi sa réputation par l'étude des caractéristiques des fractures dans les céramiques. Cependant, le département ne décerne pas de diplôme en céramique; la céramique est une spécialité facultative enseignée aux étudiants en métallurgie. Le groupe représenté comprend six personnes.

L'université McMaster s'est occupée de la formation d'ingénieurs en céramique depuis plus de 20 ans. En collaboration avec la Canadian Ceramic Society, elle a organisé un cours en céramique dans sa division des cours publics du soir. Cependant, le département de la métallurgie et de la science des matériaux a établi un cours de céramique en bonne et due forme en 1967 lors de la nomination du professeur P.S. Nicholson au corps enseignant. Au cours des années, le professeur Nicholson et ses étudiants ont grandement contribué à la science et à la technologie des céramiques, spécialement dans le frittage et l'établissement des caractéristiques mécaniques et électriques. Le groupe est très actif puisqu'il aide, dans leurs projets de développement, l'industrie canadienne et les ministères du gouvernement. Il y a eu deux secteurs particulièrement très actifs au cours des dernières années : les conducteurs ioniques, spécialement les conducteurs ioniques à ions d'hydrogène pour la mise au point des piles à combustible à hydrogène, et les essais non-destructifs des céramiques à rendement élevé. Le professeur Nicholson est connu internationalement pour ses contributions scientifiques ayant trait aux matériaux céramiques à haute température. Le groupe comprend environ 17 personnes. On a créé récemment une nouvelle chaire des sciences du verre en même temps qu'on y a nommé le professeur O. Johari. L'université offre un diplôme officiel en céramique.

L'université de Toronto avait un cours officiel en céramique durant les années cinquante, mais par suite du manque de support de l'industrie pour ses étudiants, elle a mis fin à ce cours. Toutefois, le cours a été réinstitué au cours des années soixante bien qu'il ne mène plus à un diplôme officiel spécifique. Actuellement, le professeur B. Alcock, un spécialiste reconnu mondialement comme un expert des oxydes à haute température, enseigne la céramique dans le cadre du cours sur la métallurgie et la science des métaux en plus de poursuivre ses recherches sur la technologie des plasmas. D'autre part, le professeur D. Barham du département du génie chimique a poursuivi des recherches en céramique.

L'université Queen's, de Kingston, en Ontario, possède un groupe de céramique très vivant dirigé par le professeur M. Sayer du département de physique. Les secteurs d'activité comprennent : les matériaux piézo-électriques, aussi bien monolithes qu'en couches minces; les conducteurs ioniques pour utilisation dans les accumulateurs et les piles à combustible; et la mise au point les transducteurs. Après avoir constaté l'importance des céramiques dans l'industrie, particulièrement sous l'influence de l'intérêt manifesté à l'échelle internationale dans ce domaine, le professeur R. Smith du département de la métallurgie a

TABLEAU 39

Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les universités canadiennes

Universités	Nombre de chercheurs	Activités
Université McMaster Hamilton (Ontario)	17	Propriétés mécaniques Traitement des céramiques Conducteurs ioniques, bio-verre
Université de Toronto Toronto (Ontario)	S.O.	Chimie des oxydes à haute température Technologie des fibres
Université Queen's Kingston (Ontario)	15-25	Conducteurs ioniques Céramiques piézo-électriques
Université de Windsor Windsor (Ontario)	2	Couches minces
Université Brock St. Catherines (Ontario)	2	Couches semi-conductrices
Université Western Ontario London (Ontario)	3-4	Céramiques nucléaires
Université de Waterloo Kitchener (Ontario)	2-3	Propriétés mécaniques Matériaux solaires
Université de la Colombie-Britannique Vancouver (Colombie-Britannique)	S.O.	Propriétés mécaniques Traitement des céramiques
Université McGill Montréal (Québec)	2-3	Mise au point des sialons Propriétés mécaniques Prothèses
Université de Montréal Montréal (Québec)	S.O.	Céramiques d'oxydes Coulage en barbotine
Université du Nouveau-Brunswick Frédéricton (Nouveau-Brunswick)	2	Conducteurs ioniques
Université technique de Nouvelle-Écosse Halifax (Nouvelle-Écosse)	4-6	Revêtements au plasma Électrocatalyseurs
Université Laval Québec (Québec)	2-3	Propriétés mécaniques

lancé des recherches en céramique. L'université Queen's vient d'annoncer la formation d'un Centre de technologie des matériaux de pointe, centre qui assurera des activités interdépartementales destinées à promouvoir l'utilisation des matériaux de pointe, en général, et des néo-céramiques, en particulier. Un des objectifs du centre est de regrouper les entreprises industrielles, les investisseurs de capital-risque, le gouvernement et les installations universitaires non seulement pour favoriser la recherche et le développement, mais aussi pour aider l'industrie à mettre en valeur ses produits. Dans l'atelier de travail organisé récemment par le Conseil des sciences du Canada, il a été démontré de façon évidente que l'industrie n'était pas très satisfaite de l'aide fournie par les universités dans la poursuite de ses objectifs. La création du Centre de technologie des matériaux de pointe à l'université Queen's est un premier pas sérieux pour calmer les inquiétudes de l'industrie et mérite des éloges et des encouragements. Il faut espérer que d'autres universités suivront l'exemple de l'université Queen's et que le gouvernement aidera à créer et supportera financièrement des groupes de ce genre. Le groupe de céramique de l'université Queen's comprend de 13 à 25 personnes, y compris les étudiants de la session d'été.

Les activités de l'Université technique de la Nouvelle-Écosse, sous la direction du professeur H. King, englobent un certain nombre de secteurs : les catalyseurs, les céramiques conductrices, la technologie des plasmas pour les céramiques résistant à l'érosion et à la corrosion, et les céramiques résistant à l'incendie. C'est un groupe très dynamique qui, ayant contribué au cours des années soixante à la mise au point de la technologie des matériaux piézo-électriques, est à la base des activités de deux compagnies qui produisent actuellement des néo-céramiques. Ce groupe pourrait devenir un atout important dans les activités nationales portant sur les néo-céramiques.

En ce qui a trait à l'université McGill, des travaux de recherches sur les néo-céramiques structurales ont été lancés sous la direction du professeur R. Drew.

En résumé, même si les universités canadiennes actives dans le domaine des céramiques sont peu nombreuses, elles ont néanmoins acquis une réputation internationale. Elles ont une longue expérience dans les travaux de recherche et développement et peuvent jouer un rôle déterminant pour mieux mettre en valeur les activités canadiennes dans les néo-céramiques et aider l'industrie.

7.6 Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les agences de recherches provinciales

Il y a trois agences de recherches provinciales qui ont entrepris des travaux de recherche et développement dans le secteur des céramiques : le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ), le Conseil de la productivité du Nouveau-Brunswick et l'Ontario Research Foundation (ORF).

Au cours des années, les activités du CRIQ dans le secteur des céramiques ont surtout consisté à aider l'industrie à mettre au point de nouveaux produits, de nouveaux procédés et à améliorer la productivité. Jusqu'ici, presque toutes les activités ont porté sur les céramiques traditionnelles. Toutefois, le CRIQ se tourne vers les néo-céramiques et leurs avantages et s'attend à augmenter ses activités dans ce secteur au cours des années à venir. Le groupe actuel de la céramique comprend trois chercheurs et il fait partie de la division des matériaux et du traitement.

Le Conseil de la productivité du Nouveau-Brunswick n'a pas présentement de groupe officiel de céramique. Il poursuit toutefois un certain nombre d'activités ayant rapport à la céramique comme l'indique le tableau 40.

Le groupe de la céramique de l'Ontario Research Foundation est de loin le groupe le plus ancien et le plus important au Canada et il a acquis une réputation internationale pour ses contributions à la science des céramiques. Le personnel de la Fondation a publié plus de 75 mémoires scientifiques et techniques.

Bien que la Fondation ait fourni de l'aide à l'industrie depuis 1930, le groupe de la céramique n'a été officiellement formé qu'en 1959. Depuis lors, le groupe a grandement contribué à l'industrie de la céramique au Canada en lui offrant des services de recherche et développement et d'essais. On peut mentionner, parmi les clients industriels importants, les compagnies suivantes : Corning Glass, Northern Pigment Co., Canadian Chromalox Co., Blue Mountain Pottery, BM Hi-Tech Inc., Almax Industries, Quality Hermetics, Holmes Insulation, Day Specialties Ltd., Design Precision Casting Co., Technifluids et Neo Industries Ltd.

En plus de servir l'industrie, la Fondation continue à fournir des services de recherche et de développement à un certain nombre de ministères du gouvernement fédéral, particulièrement le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, le Conseil national de recherches et les ministère de la Défense nationale. Elle a aussi participé à des programmes industriels financés par le ministère de l'Industrie et du Commerce (maintenant le ministère de l'Expansion industrielle régionale) par la voie de programmes tels le PAIT et l'EDP.

Le groupe de la Fondation fonctionne actuellement avec 25 chercheurs et techniciens, et il constitue le groupe le plus important capable de venir en aide à l'industrie et au gouvernement. Il semble bien que la Fondation vienne de déclencher une nouvelle vague d'activités dans ce domaine par la création d'un " Centre des matériaux " grâce à l'aide du gouvernement de l'Ontario. Le tableau 40 présente quelques-unes des activités courantes de la Fondation.

TABLEAU 40

Activités de recherche et de développement sur les néo-céramiques dans les agences de recherches provinciales

Agences	Activités
CRIQ Québec (Québec)	Groupe nouvellement formé
Conseil de la productivité du Nouveau-Brunswick	Traitement des matières premières Essais non destructifs, corrosion Mise au point de matériaux pour les accumulateurs
Ontario Research Foundation (ORF) Sheridan Park, Mississauga (Ontario)	Technologie sol-gel : - céramiques monolithes - utilisations résistant aux flammes - revêtements à l'infrarouge Céramiques pour moteurs : - ZrO_2 pour moteurs Diesel - caractéristiques de résistance à l'érosion et à la corrosion - revêtements au plasma Essais non destructifs Conducteurs ioniques Céramiques piézo-électriques Néo-céramiques - Nitrure de bore - Céramique de verre - Technologie des fibres

7.7 Avantages et désavantages pour l'industrie canadienne

7.7.1 Généralités

La technologie de pointe est devenue essentielle à la survie de beaucoup d'industries canadiennes, sinon de la plupart, mais, ce qui est encore plus important, elle aura aussi un rôle majeur à jouer dans la création d'industries nouvelles. Jusqu'ici, la croissance du Canada dépendait surtout, de façon générale, de l'exploitation des richesses naturelles du pays; de nos jours, toutefois, sous l'effet de pressions économiques le Canada se verra forcé de passer de la simple exploitation de ses richesses naturelles à la création d'industries de technologie de pointe qui aideront à transformer l'infrastructure industrielle du pays. La fabrication de produits de plus grande valeur ajoutée, l'économie de l'énergie, la poursuite de travaux de recherche et de développement plus nombreux et la création d'industries à prédominance de capital sont parmi les objectifs que devra se donner l'industrie canadienne. Le défi économique fondamental à relever au cours de la prochaine décennie sera de passer de l'assujettissement aux richesses naturelles à la création de la richesse à l'aide de produits de technologie de pointe et du développement d'industries à prédominance de connaissances nouvelles. Cette tendance est déjà en marche comme l'indiquent les exportations canadiennes pour les années 1964 et 1984.

Produits	% 1964	% 1984
Aliments	22,2	9,6
Matières premières	19,4	15,6
Matériaux ouvrés	42,2	31,6
Véhicules et pièces	2,1	26,1
Machinerie et outillages	9,8	12,4
Biens de consommation	1,8	3,0
Autres	2,5	1,6

Le Japon a démontré de façon non équivoque que les néo-céramiques jouent un rôle essentiel dans la création de produits et d'industries de technologie de pointe. Au cours des années soixante-dix, pour tirer profit des céramiques électroniques, le Japon a mis au point une technologie très évoluée qui a eu deux avantages spécifiques : tout d'abord la création d'industries de technologie de pointe pour fabriquer des éléments de céramique électronique, et, deuxièmement, la création d'autres industries de technologie de pointe dans des domaines comme l'électronique, les télécommunications, la robotique, la bureautique, etc. Ces industries ont elles-mêmes eu des répercussions marquées sur le bien-être socio-économique du Japon en ce qui a trait à l'emploi, au potential d'exportation, à l'amélioration de la productivité et, en général, à la richesse du pays. D'autres pays industrialisés, (États-Unis, République fédérale d'Allemagne, Suède, Royaume-Uni, France) emboîtent le pas au Japon. On en arrive inévitablement à la conclusion que le Canada n'a pas d'autre choix que celui de s'engager fermement à mettre sur pied et à soutenir une industrie fondamentale de néo-céramiques qui aide à créer et à appuyer d'autres industries de technologie de pointe.

Comme au Japon, l'industrie et la société canadiennes subiront les effets de l'utilisation grandissante des néo-céramiques et de l'amélioration de ce type de produits. On peut ramener ces effets aux quatre points suivants :

- A mesure que se développera et progressera la technologie des néo-céramiques, diverses industries connexes verront le jour dans les domaines de la conception et de la combinaison des matériaux pour obtenir les propriétés voulues, ainsi que dans le secteur de la fabrication des céramiques.

- L'avènement et la croissance de l'industrie des néo-céramiques stimuleront l'industrie locale et l'économie régionale.

- Grâce à la venue d'entreprises nouvelles dans le domaine de la fabrication des néo-céramiques, il sera possible de revitaliser l'industrie des matériaux, de renforcer la concurrence à l'échelle internationale et de stimuler la croissance d'industries de technologie de pointe semblables.

- L'utilisation de plus en plus grande des néo-céramiques aura un effet favorable sur l'économie nationale en ce qui a trait à l'économie d'énergie, à l'augmentation de la productivité et à la création de nouveaux emplois.

Il semble y avoir unanimité sur le fait que l'élément moteur de la croissance économique du Canada ne sera plus, comme auparavant, la mise en valeur des richesses naturelles. Au cours des dernières décennies, il y a eu, en fait, un ralentissement dans ce secteur par rapport aux autres. Les chiffres donnés plus haut montrent que, en 1964, les exportations d'aliments (surtout le blé) et de matières brutes ou ouvrées représentaient 84 % du total des exportations canadiennes, alors qu'elles étaient tombées à seulement 54 % de ce total en 1984. Ce n'est pas le fait du hasard. A un moment donné, l'avantage du Canada était que le pays disposait d'énormes richesses naturelles qu'on pouvait exploiter et transformer (avec une aide considérable des investisseurs étrangers). Aujourd'hui, d'autres pays peuvent mieux se plier à ce type d'exploitation, en particulier, les pays en voie de développement qui disposent de ressources et d'une main-d'oeuvre bon marché. Plusieurs entreprises canadiennes d'exploitation des richesses naturelles font face à une concurrence exceptionnellement féroce. Dans le contexte global, plusieurs installations canadiennes de production semblent ne plus être rentables. Les néo-céramiques offrent une solution nouvelle à ces compagnies, leur permettant ainsi de diversifier leurs activités et de se concentrer sur la production de marchandises (et de services) qui ont une valeur ajoutée supérieure et qui requièrent une technologie plus avancée et des compétence de gestion et de mise en marché supérieures.

Étant donné que le champ d'application des néo-céramiques est très vaste et qu'on s'occupe encore d'en mettre la technologie au point, les petites entreprises de classe supérieure pourront aisément y trouver leur place et prospérer, comme la chose se produit au Japon. On peut classifier les activités de ces plus modestes entreprises de classe supérieure, du point de vue de la technologie de fabrication, en trois types principaux :

° fabrication générale des néo-céramiques tant fonctionnelles que structurales;

° orientation vers les secteurs connexes, c'est-à-dire, non pas la fabrication de néo-céramiques, mais plutôt la mise au point de matériel, d'outillage et d'appareils de fabrication ou autres en vue de la production de néo-céramiques;

° spécialisation dans des secteurs précis, pour la fabrication de pièces et de matériaux fonctionnels comme les détecteurs ou les céramiques optiques.

On peut regrouper les raisons qui poussent les entreprises à se lancer dans le domaine des néo-céramiques en trois grandes catégories :

° La diversification, permettant aux fabricants de matériaux de recourir à la technoloige existante pour obtenir une plus grande valeur ajoutée pour leurs produits et créer des produits plus avantageux que jamais. Au Japon, c'est ce qui motive de nombreuses entreprises textiles, pétrochimiques et métalliques.

° L'amélioration d'une technologie existante, dans laquelle la recherche et le développement axés sur les marchandises produites par une compagnie, (verre et matériaux réfractaires, par exemple) permettent de donner à celles-ci de nouvelles caractéristiques et de nouvelles fonctions grâce auxquelles la compagnie pourra passer à une production ayant une valeur ajoutée élevée.

° La participation des compagnies de traitement et de montage à ce même marché, les usagers de matériaux étant poussés par la nécessité à mettre au point eux-mêmes de nouveaux matériaux. Parmi les exemples typiques d'industries de cette catégorie, on peut citer l'électricité et l'électronique, l'automobile, la machinerie, l'industrie lourde et de l'acier, et l'ingénierie.

En ce moment, le commerce des néo-céramiques prend l'allure d'un marathon où les participants sont nombreux. De l'avis général, la moitié de la course n'est pas encore terminée et tous les coureurs sont groupés en un peloton serré. **On croit que dans le secteur des céramiques électroniques, un domaine qui requiert des compétences spécialisées supérieures, et dans la mise au point des détecteurs, de petites compagnies et entreprises à risques élevés peuvent finir la course en tête, alors que dans les céramiques techniques, à cause de la nature même des affaires, les grandes entreprises ont l'avantage.** Les fabricants d'automobiles qui mènent des études conjointement avec les fabricants de céramiques ont, au départ, une grande avance dans le secteur des moteurs de céramique. On croit généralement que les fabricants d'automobiles, qui consacrent énormément d'efforts à la recherche et au développement, conserveront probablement la technologie pour leur propre usage ou ne la partageront qu'avec un très petit nombre de fabricants de matériaux. Certains croient toutefois que les fabricants de matériaux et d'autres entreprises assumeront le rôle de fabricants de pièces d'autos dans des ententes commerciales ou des projets communs de développement avec les fabricants d'automobiles.

Pour rattraper le temps perdu, les retardataires dans le domaine des céramiques (et ceci s'applique aussi aux pays) devront obtenir leur technologie par l'intermédiaire d'ententes établies avec des fabricants étrangers ou avec des fabricants locaux plus perfectionnés, s'il y en a. Ce qu'il faut avant tout, ce sont des personnes de talent capables d'acquérir et de conserver un degré élevé de compétence technique dans le domaine des néo-céramiques; cela ne veut cependant pas dire qu'une compagnie qui est nouvelle dans ce domaine ou en retard au point de vue technologique, pourra se propulser subitement au premier rang tout simplement par la recherche et l'engagement de personnes compétentes. Le succès dépend avant tout de l'accumulation de la technologie et de l'expérience.

7.7.2 Incidence du développement international

Comme on l'a mentionné plus haut il y a une très forte concurrence à l'échelle internationale entre le Japon, les États-Unis, la République fédérale d'Allemagne et la Suède dans la mise au point et la commercialisation des néo-céramiques, à cause de l'immense marché que prévoient ces pays pour les décennies à venir et des avantages socio-économiques que représentera l'appropriation d'une part importante de ce marché. C'est le Japon qui, par défaut, s'est jusqu'ici adjugé la première place; il a déjà introduit dans le commerce un certain nombre d'éléments de céramique pour les moteurs Diesel et travaille à la mise au point de plusieurs autres pour les prochaines années. Il n'est pas sûr toutefois qu'il puisse conserver longtemps cette avance, ou gagner la course. Cette incertitude n'est pas due au fait que le Japon est moins engagé à conserver sa part dominante actuelle du marché mondial (évaluée à environ 50 % de toutes les néo-céramiques) ou au fait qu'il est moins disposé à engager les énormes ressources de personnel et de

financement qu'exigent la recherche et le développement, non plus qu'au fait qu'il y aurait un changement dans la stratégie nationale, mais parce que les États-Unis et la République fédérale d'Allemagne se sont rendu compte, bien que tardivement, de leur position vulnérable et ont mis en oeuvre des stratégies nationales destinées à se mettre en mouvement pour capturer et maintenir leur part du marché. De plus, le Royaume-Uni, la France et même la Communauté économique européenne ont pris des mesures énergiques pour récupérer le terrain perdu vis-à-vis leur part du marché et les avantages socio-économiques correspondants.

Parmi les pays industrialisés de l'Ouest, le Canada est le seul qui n'ait pas adopté une position. Compte tenu de l'activité internationale présente, il est évident que le Canada se doit de faire face aux menaces possibles faites à son bien-être économique, menaces qui pourraient résulter des progrès technologiques réalisés dans les autres pays, et de prendre une attitude positive et tirer avantage des occasions favorables qui se présentent. Autrement dit, le Canada devrait participer à la course, non pas pour la gagner mais pour s'implanter fermement dans le marché des néo-céramiques.

Pour déterminer quelles sont les avantages et des désavantages pour l'industrie canadienne, il est nécessaire d'évaluer de façon critique et réaliste la situation internationale actuelle. La figure 28 présente sous forme de schéma les forces qui s'exerceront sur le Canada. La République fédérale d'Allemagne et la Suède auront toutes deux un effet direct sur le Canada : l'Allemagne parce que Volkswagen fabrique déjà des pièces d'automobiles au Canada; la Suède, parce qu'elle procède au montage des voitures Volvo au Canada.

On s'attend toutefois, à ce que la plus forte partie de l'impact vienne du Japon et des États-Unis: du Japon d'abord, à cause de son avance technologique, et des États-Unis parce qu'ils sont le principal partenaire commercial du Canada. Il est donc important de tenir compte de la nature des forces qui existent dans ces deux pays et d'examiner de quelle façon elles pourraient affecter le Canada.

Sans le moindre doute, le Japon occupe le premier rang dans le domaine des néo-céramiques électroniques : il s'est attribué la part du lion dans ce marché et contrôle de 70 % à 80 % de la consommation mondiale. Trois facteurs importants lui ont permis de se hisser à ce niveau : dès le début des années soixante-dix, l'industrie japonaise s'est rendu compte de l'importance de la mise en valeur des céramiques électroniques pour venir en aide aux industries électroniques et aux autres industries de technologie de pointe, comme les communications, la robotique, etc.; il y avait dans la littérature scientifique provenant en grande partie des États-Unis, du Royaume-Uni et de l'Europe, une source considérable de connaissances scientifiques et techniques disponibles; enfin, le Japon a utilisé des méthodes différentes de création de marchés (créer de nouveaux marchés plutôt que de combler les marchés existants). L'expérience technologique et la compétence acquises par plus de dix ans

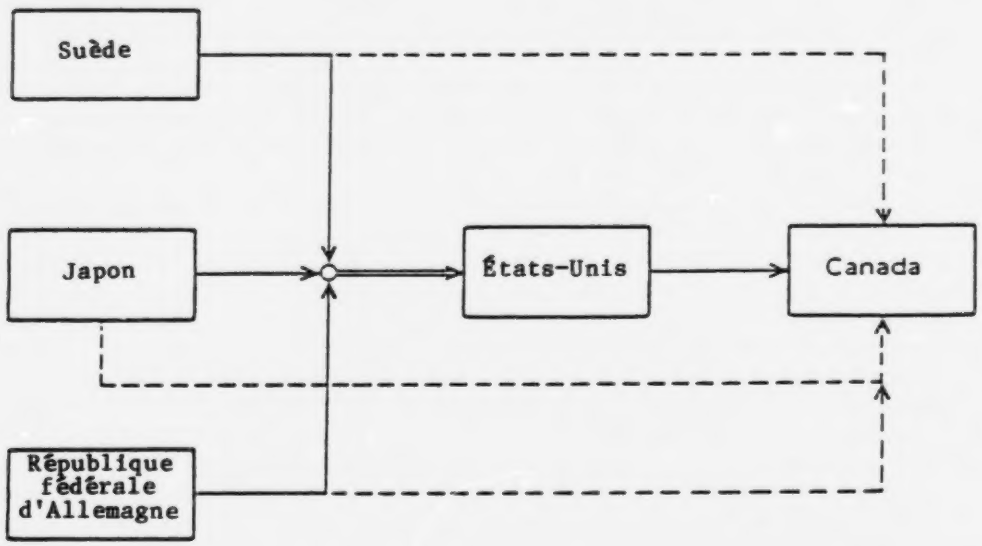


FIGURE 28 : Pressions internationales qui s'exercent sur le Canada dans la répartition du marché mondial.

de pratique dans la fabrication et la commercialisation de céramiques électroniques a été très utile au Japon lorsqu'il s'est tournée vers la nouvelle technologie ayant trait aux néo-céramiques destinées aux moteurs et à d'autres utilisations. En fait, la position dominante du Japon dans le domaine des néo-céramiques est, en général directement rattachée à cet avantage.

Les obstacles technologiques qui s'opposent à la commercialisation des néo-céramiques structurales pour les moteurs sont énormes. On met actuellement au point les connaissances scientifiques et techniques nécessaires à la solution de certains de ces problèmes. Ce qui est plus important c'est qu'après avoir investi dans des travaux de recherche et de développement pendant presque 8 ans, une très forte pression s'exerce dans le sens que cet investissement soit justifié par le volume des ventes courantes plutôt par le potentiel des marchés futurs. C'est pourquoi plusieurs compagnies commercialisent leur technologie existante. Ceci s'est traduit par le développement de certains marchés industriels, comme les pompes et les pièces d'usure, et par la mise en marché de biens de consommation comme les couteaux et les ciseaux. Il semble toutefois que de grandes compagnies comme Toshiba, Sumitomo, Kyocera et NGK se soient engagées à la mise au point des néo-céramiques structurales pour les moteurs. Comme ces compagnies ont d'immenses ressources et qu'elles occupent déjà les marchés des céramiques, il leur est possible de justifier l'accent plus marqué mis dans la recherche et le développement consacrés à la mise au point des céramiques destinées aux moteurs, en vue des marchés futurs. Les petites compagnies n'ont pas le même avantage.

En ce qui concerne l'avenir, il n'y a aucun doute que le Japon réussira à mettre au point et à commercialiser des pièces de moteurs en néo-céramique. Ceci aura un effet double sur le Canada. Un effet direct tout d'abord, parce que la part du Japon du marché des automobiles au Canada est d'environ 23 %, et que les compagnies japonaises pourront, dans les années à venir, participer à la fabrication de pièces d'automobiles en céramique au Canada. Deuxièmement, comme le Japon détient une part d'environ 24 % du marché des automobiles aux États-Unis, tout avancement réalisé au Japon aura un impact sur le marché américain et, par ricochet, sur le Canada.

Les États-Unis se sont rendu compte de la menace que constitue le Japon et ont pris un certain nombre de mesures pour remettre leur " machine " en mouvement dans la mise au point et la commercialisation des néo-céramiques structurales. Tant le gouvernement fédéral que l'industrie américaine ont pris position : le gouvernement a augmenté le financement des travaux de recherche et développement aussi bien pour des programmes de démonstration que pour la recherche pure dans les universités, les laboratoires nationaux et les laboratoires privés; l'industrie, et en particulier les grandes entreprises, ont entrepris la mise au point des technologies de matériaux et de procédés de pointe. Plus de 1 000 scientifiques et ingénieurs travaillent dans ce domaine et la dépense annuelle totale est de l'ordre de 100 millions de dollars.

Les problèmes de sécurité nationale aussi bien que les questions socio-économiques sont à la base des initiatives du gouvernement américain. On croit que la sécurité nationale aura un grand effet sur les plans et les engagements futurs. Les avantages qui découlent de l'incorporation d'éléments de néo-céramique dans les véhicules militaires (camions, chars d'assaut, etc.) ont beaucoup plus de poids que les questions de dépenses. Il est donc à prévoir que l'utilisation des néo-céramiques pour la défense nationale influencera plus que toute autre le marché américain. De plus, il y aura un besoin énorme de matériaux nécessaires aux futures " mesures de défense stratégique "; on s'attend d'ailleurs à ce que les activités centrées sur la mise au point des céramiques destinées aux exigences de la défense nationale s'accélèrent à un rythme rapide.

Par le passé, les États-Unis ont toujours été en première position pour l'avancement de la science et de la technologie à l'échelle mondiale. Comme la solution à certains des obstacles importants qui s'opposent à la commercialisation des néo-céramiques structurales dépend des percées dans le secteur de la science et de la technologie, les États-Unis ont un avantage marqué, surtout parce que de grandes universités américaines participent à l'avancement de cette science et de cette technologie (par exemple : Rutgers, MIT, Stanford).

On s'attend à ce que ces développements, aux États-Unis, aient un impact important sur le Canada pour les raisons suivantes :

- les États-Unis sont le plus important partenaire commercial du Canada; ils reçoivent plus de 70 % des exportations canadiennes;

- le North American Auto Pact (pacte de l'automobile de l'Amérique du Nord) offre aux fabricants canadiens (de propriété canadienne, aussi bien qu'aux filiales d'entreprises étrangères) la possibilité de tirer profit d'avantages commerciaux dans le secteur des néo-céramiques;

- l'entente de partage de la production de la défense Canada/États-Unis offre d'autres possibilités de participation;

- l'énergie à coût relativement peu élevé et les abondantes ressources en matières premières du Canada, situé tout près de la frontière américaine et de ses grandes industries automobiles, assurent au Canada une position économique particulièrement avantageuse;

° l'industrie et le gouvernement des États-Unis sont pleinement conscients des réalisations japonaises dans le domaine des néo-céramiques jusqu'ici et de la possibilité que le Japon obtienne une position de supériorité dans cet énorme marché. On s'attend à ce que les États-Unis réagissent de façon marquée pour conserver leur part du marché.

7.7.3 Possibilités de débouchés dans le secteur des néo-céramiques fonctionnelles

On prévoit que le marché des néo-céramiques fonctionnelles s'accroîtra à un rythme accéléré pour répondre aux exigences des industries de technologie de pointe, tant pour les besoins du pays que pour l'exportation. En ce moment, le Canada dispose d'une base et d'une infrastructure relativement solides dans les secteurs de l'électronique, de l'information et des communications, ainsi que des ordinateurs. D'autres secteurs, comme la robotique et la biotechnologie, commencent à voir le jour et devraient connaître une croissance sensible au cours de la présente décennie. Toutes ces industries ont besoin de néo-céramiques et doivent présentement les importer.

Les résultats de la présente étude indiquent qu'il existe un certain nombre d'ouvertures pour l'industrie canadienne dans ce marché en pleine croissance; ces ouvertures s'offrent aussi bien aux entreprises existantes qu'à des entreprises qui ne sont pas encore constituées. On considère que ces ouvertures sont particulièrement attrayantes à cause des besoins à court ou à moyen terme du marché. De plus, elles sont assez diverses pour convenir aux besoins des petites, des moyennes et des grandes entreprises.

On admet généralement, dans le milieu technique, que les secteurs suivants des néo-céramiques fonctionnelles auront un effet marqué sur le marché à court et à moyen terme (5 à 10 ans) :

- Fibres optiques
- Optique intégrée
- Condensateurs multicouches
- Semi-conducteurs
- Céramique piézo-électrique
- Céramique pyro-électrique
- Conducteurs ioniques
- Détecteurs

Le tableau 41 présente les liens qui existent entre le domaine de la technologie et le domaine commercial. Sauf peut-être pour l'optique intégrée, toutes les autres céramiques sont déjà fabriquées au Canada ou devraient l'être bientôt. Pour les besoins du marché, on doit déployer des efforts de recherche et de développement dans les secteurs déjà à l'étude ou on les entreprendra si on n'a pas encore commencé à s'y intéresser activement. Les quatre dernières catégories de technologies conviennent particulièrement aux petites et moyennes entreprises parce qu'elles concernent des utilisations spécialisées demandant des antécédents techniques solides.

TABLEAU 41

Ouvertures dans le secteur des néo-céramiques fonctionnelles pour l'industrie canadienne

Domaine technologique	Domaine commercial
Fibres optiques	Communications Réseaux d'information
Optique intégrée	Communications Réseaux d'information Détecteurs optiques Traitement des signaux optiques Mécanographie optique
Condensateurs multicouches	Électronique Ordinateurs
Semi-conducteurs	Électronique Détecteurs Catalyseurs
Céramiques piézo-électriques	Transducteurs Détecteurs Affichages électro-optiques
Céramiques pyro-électriques	Détecteurs Dispositifs optiques
Conducteurs ioniques	Détecteurs Stockage d'énergie (accumulateurs) Piles à combustible Électrolyseurs Minuteries et coulomètres Éléments chauffants

Le Canada fait état, dans la recherche et développement en électronique, d'une longue expérience qui date des années cinquante. Les travaux de " défrichement " exécutés par la section des céramiques du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources sur les céramiques piézo-électriques à base de titanate de baryum durant les années cinquante et soixante ont conféré au Canada une position scientifique internationale et ont été à la base de la formation des deux compagnies de fabrication actuelles. Plus récemment, ce laboratoire s'est consacré activement à l'étude des céramiques en vue de leur utilisation dans le domaine de l'énergie, sous forme de conducteurs ioniques et de piles à combustible; ces recherches ont attiré l'attention de l'industrie, en particulier de la compagnie Hamilton Porcelains Ltd., qui en a tiré profit en mettant au point des accumulateurs pour véhicules à propulsion électrique.

A Ottawa, la compagnie Northern Electric, a été parmi les premières à mettre au point des céramiques magnétiques au cours des années cinquante et soixante; cependant, la nature de ses activités s'est modifiée au cours des années pour emboîter le pas au progrès de la science et de la technologie et s'adapter aux demandes et aux débouchés du marché.

Il ne semble pas y avoir de doute sur le fait que, à court terme, les débouchés qu'offre le marché des néo-céramiques sont très considérables. Le Canada dispose d'une excellente base industrielle, (petites, moyennes et grosses entreprises) et il existe une infrastructure scientifique et technique considérable dans les laboratoires du gouvernement fédéral, les agences de recherches des gouvernements fédéral et provinciaux et les universités : il faudrait faire des efforts coordonnés pour exploiter tous ces avantages.

7.7.4 Possibilités de débouchés dans le secteur des néo-céramiques structurales

Trois secteurs d'activités au Canada présentent un intérêt particulier pour l'utilisation des néo-céramiques. Ce sont :

- les poudres céramiques;
- les utilisations autres que pour les moteurs;
- les utilisations dans les moteurs.

7.7.4.1 Poudres céramiques

Il semble bien qu'un marché à long terme soit annuré pour les néo-céramiques structurales à base de carbure de silicium, de nitrure de silicium et de zircone; la nécessité de la mise au point et de la commercialisation de poudres céramiques appropriées prend donc, de ce fait, une dimension nouvelle. L'activité internationale dans ce secteur n'est pas aussi intense que dans le cas des éléments de céramique et il y a place pour des innovations scientifiques et techniques dans la mise au point de nouvelles technologies. De plus,

les dépenses pour les travaux de recherche et développement des poudres ne semblent pas aussi élevées que celles pour la mise au point, les essais et la commercialisation des éléments fabriqués. En outre, le Canada comprend un certain nombre de grandes compagnies de produits chimiques qui peuvent entreprendre ces travaux et ainsi ajouter des débouchés additionnels à leur production courante.

Les exigences fondamentales sont : des frais peu élevés (environ 5 US/kg), une bonne qualité, ainsi qu'une qualité et un approvisionnement fiables.

Poudres de carbure de silicium (SiC)

Comme on l'a mentionné plus haut, un certain nombre de compagnies fabriquent du carbure de silicium au Canada parce qu'elles peuvent s'approvisionner de façon sûre et bon marché en énergie électrique. Le produit est toutefois expédié aux États-Unis pour y être transformé. Il faudrait étudier sérieusement les possibilités de traiter les poudres de carbure de silicium au Canada.

Le carbure de silicium est produit spécialement en vue de la fabrication de néo-céramiques. Présentement, il ne se fabrique pas de néo-céramiques au Canada et il conviendrait d'examiner cette question.

Poudres de nitrure de silicium (Si_3N_4)

Le nitrite de silicium semble être le matériau préféré et on s'attend donc à ce que la demande pour ce produit augmente à mesure qu'il pénétrera le marché. Il existe actuellement un certain nombre de technologies pour la fabrication de la poudre, mais il y a encore place, malgré tout, pour la mise au point de nouveaux procédés. Il existe un certain nombre de fabricants qui produisent la poudre à l'échelle commerciale en République fédérale d'Allemagne, au Japon et aux États-Unis. La qualité et le prix de la poudre constituent encore des problèmes. L'ensemble des techniciens a abordé sérieusement la question de la qualité et espère arriver à une solution sous peu. Quant au prix, il demeurera un problème jusqu'à ce que la pénétration du marché ait augmenté suffisamment pour que la production à grande échelle arrive à réduire les coûts de production.

On croit qu'il existe des possibilités pour que l'industrie canadienne occupe une place dans ce secteur, plus particulièrement les fabricants actuels de poudres céramiques et les compagnies de produits chimiques. D'une certaine façon, le fait qu'il s'agisse d'un marché à moyen et à long terme constitue un avantage, puisque les chercheurs disposeront de temps pour tenter d'innover et de mettre au point des procédés nouveaux. On donnera toutefois la préférence au transfert de la technologie provenant des fabricants étrangers. Alcan a déjà pris des mesures pour tirer avantage de ces possibilités.

Poudres de zircone (ZrO_2)

Le marché des néo-céramiques à base de zircone est à la hausse, mais il semble que ce soit un marché très concurrentiel où l'Australie vient en tête. Le Canada a un certain avantage parce qu'il existe un gisement de bonne qualité dans le nord du Québec. L'exploitation de cette ressources minérale représente une ouverture pour le Canada, particulièrement parce qu'on dit que le minerai contient de l'oxyde d'yttrium qui sert non seulement à la fabrication de zircone durcie mais qui est aussi utilisé dans la fabrication de céramiques de nitrite de silicium.

7.7.4.2 Utilisations autres que pour les moteurs

Les néo-céramiques structurales ont déjà pénétré le marché dans un certain nombre de secteurs autres que celui des moteurs, particulièrement dans l'industriel (pompes de produits chimiques, fabrication de pièces d'acier, échangeurs de chaleurs, buses de soudage, etc.), pour la fabrication des pièces de machinerie et d'outils coupants, et pour les produits de consommation. Les propriétés requises pour ces produits ne sont pas aussi élevées que pour les moteurs. De plus, la technologie nécessaire à la fabrication de ces produits existe déjà.

On croit que les compagnies canadiennes auraient grand avantage à participer à ce marché. La meilleure voie pour y entrer est d'abord le transfert de la technologie, puis la mise au point de nouveaux produits. La réussite dépend des méthodes nouvelles adoptées pour créer de nouveaux marchés par la création de nouvelles utilisations.

Parmi les industries canadiennes susceptibles d'utiliser ces matériaux, on peut mentionner l'industrie minière, les aciéries, les alumineries et les usines de transformation des produits chimiques. Une entreprise minière canadienne a déclaré que ses besoins en matériaux résistant à l'usure dépassaient les 5 millions de dollars par année. On estime le marché des secteurs de l'érosion et de la corrosion à plus de 100 millions de dollars par année.

Un autre marché possible est l'utilisation de ces matériaux pour les sports et loisirs et pour les biens de consommation.

7.7.4.3 Utilisation dans les moteurs

Dans ce domaine, la concurrence au niveau international est extrêmement serrée, tout d'abord parce qu'on sent qu'il s'agit là d'un marché dont le potentiel est tributaire des questions qui n'ont pas de portées commerciales, comme la sécurité nationale, la protection des marchés nationaux, le maintien de la part du marché à l'échelle internationale ainsi que d'autres questions

socio-économiques. Des pays comme le Japon, les États-Unis, la Répubique fédérale d'Allemagne et, jusqu'à un certain point, la Suède ont fait d'énormes investissements au cours des dix dernières années pour mettre au point et commercialiser les néo-céramiques en vue de leur utilisation dans les moteurs. Bien que la technologie fondamentale existe déjà, il reste encore un certain nombre de problèmes technologiques à résoudre. Les trois plus importants de ces problèmes sont les suivants : la reproductibilité de la fabrication, la fiabilité du service et le prix de la fabrication. Le Japon, les États-Unis et la République fédérale d'Allemagne investissent des millions de dollars pour résoudre ces problèmes. Le Japon semble avoir pris de l'avance, puisqu'il a déjà introduit sur le marché un certain nombre d'éléments de moteurs et s'est lancé dans une stratégie industrielle afin d'augmenter sa pénétration sur le marché.

La réaction des fabricants nord-américains et européens de véhicules à moteur à l'introduction d'éléments de céramique dans les moteurs n'est pas aussi nette que celle des fabricants d'automobiles japonais. Ceci est compréhensible parce que la priorité principale, en ce moment, est de réduire les frais pour mieux concurrencer les importations japonaises. Quoi qu'il en soit, on semble admettre unanimement, même au Japon, que, lorsque la décision sera prise, les fabricants d'automobiles entreprendront eux-mêmes la production de ces pièces ou s'associeront avec des fabricants de céramiques bien établis.

Il devient par conséquent évident que les débouchés à court terme pour l'industrie canadiennes sont limitées (de 0 à 5 ans). A moyen terme (de 5 à 10 ans) et à long terme (au-delà de 10 ans), ils semblent être satisfaisants. Si le Canada désire profiter des futurs débouchés du marché, c'est aujourd'hui qu'il doit s'engager dans cette voie.

Il est peu probable que le Canada puisse générer et investir des ressources aussi importantes que celles des autres pays (par exemple, environ 2 000 scientifiques et 4 000 technologues au Japon seulement). Dans toute décision ayant trait aux investissements, le Canada ne doit tenir compte que de son marché intérieur et non du marché des exportations parce qu'il est probable que les fabricants de ces pays, qui ont déjà engagé d'énormes montants d'argent, tenteront de protéger leurs propres marchés. De plus, comme le Canada doit importer la technologie nécessaire, du moins dans le futur immédiat, il n'y a pas plusieurs solutions.

Dans le cadre du pacte de l'automobile de l'Amérique du Nord, le Canada pourra être en mesure d'en venir à un arrangement avantageux avec les compagnies américaines. Il est peut être possible de conclure des ententes semblables avec les compagnies japonaises et d'autres compagnies étrangères. De toute façon, le transfert de la technologie semble être la meilleure route à suivre au point de vue économique et commercial.

Compte tenu de l'énorme potentiel du marché et des autres avantages économiques qui peuvent en découler, le Canada devrait songer à mobiliser immédiatement l'infrastructure considérable qui existe déjà dans les laboratoires du gouvernement fédéral, les organismes de recherches des gouvernements provinciaux, les universités et l'industrie. Bien que retreint, le milieu scientifique canadien voué à la céramique s'est taillé une place remarquable dans ce domaine comme en font foi les 326 mémoires scientifiques publiés entre 1953 et 1983 dans la publication intitulée Journal of the American Ceramic Society, comparativement aux 4 440 provenant de tous les laboratoires américains, ce qui est en soi une excellente réalisation.

Dans tous les pays qui poursuivent des recherches sur les néo-céramiques, l'industrie détermine les directions à suivre et les gouvernements leur donnent le support nécessaire. La clé du succès réside essentiellement dans la participation de l'industrie à ces recherches. Comme au Japon, aux États-Unis et en Europe, le gouvernement canadien se doit de jouer un rôle de catalyseur pour mobiliser la participation industrielle.

7.8 Ouvertures, obstacles et autres solutions

Une évaluation objective des marchés mondiaux ouverts aux néo-céramiques, dans laquelle on a tenu compte de la portée, du temps et des forces concurrentielles internationales qui se lancent à l'assaut de ce marché (particulièrement l'avance considérable déjà prise par le Japon, les États-Unis, la République fédérale d'Allemagne et la Suède), démontre que l'industrie canadienne peut tirer profit des possibilités qui existent dans les secteurs techniques et commerciaux suivants :

- les néo-céramiques fonctionnelles, particulièrement les céramiques électroniques, les céramiques optiques, les fibres optiques, les détecteurs et les céramiques dentaires;
- les néo-céramiques structurales destinées à d'autres utilisations qu'aux moteurs, particulièrement à l'industriel aux outils coupants, aux produits liés aux loisirs et aux biens de consommation;
- les néo-céramiques structurales pour les moteurs et autres applications connexes.

On considère que les ouvertures offertes par les céramiques fonctionnelles et les néo-céramiques structurales pour des utilisations autres que pour les moteurs sont celles qui méritent le plus une attention immédiate. Dans le premier cas, le marché est bien établi et le taux de croissance prévu pour les deux prochaines décennies dépasse

15 %. Ce qui est plus important ici, c'est qu'il existe déjà une infrastructure industrielle et de recherche et développement considérable, de telle sorte que la croissance future peut se faire à partir des éléments existants avec un minimum d'investissements et de retard. Un certain nombre de compagnies multinationales sont activement engagées dans quelques-uns de ces domaines, et on peut prévoir que les forces du marché les pousseront à accélérer davantage le rythme de leurs investissements en vue d'accroître leur production. C'est un excellent secteur de croissance pour les petites compagnies canadiennes déjà formées, tout comme pour la création de nouvelles entreprises de petite taille.

Le marché des néo-céramiques structurales destinées à d'autres fins que les moteurs est plus diversifié et il faudra faire preuve d'imagination pour y pénétrer. Par ailleurs, il croît rapidement à cause du fait que l'on peut de substituer aux matériaux existants d'autres matériaux susceptibles de mieux restabliser les dépenses et le rendement. C'est aussi le secteur qui convient le mieux aux petites industries; cependant, les grandes entreprises de fabrication de produits chimiques, d'acier, d'aluminium, de textiles et d'autres produits pourront trouver profit à investir dans ce secteur pour répondre à leurs propres besoins aussi bien que pour desservir d'autres marchés, y compris les marchés d'exportation. Les outils coupants semblent constituer un marché exceptionnellement intéressant, avec un potentiel intérressant à court terme (0 à 5 ans).

Les problèmes liés à la technologie et aux dépenses, qui s'opposent à la commercialisation des néo-céramiques structurales utilisées dans les moteurs, sont énormes. Pour ces raisons, précisément, les fabricants d'automobiles nord-américains n'ont pas encore pris position, bien qu'on s'accorde généralement à penser qu'ils réagiront rapidement si les Japonais voient leurs efforts couronnés de succès. La création et la pénétration des marchés vont donc prendre du temps et on ne prévoit pas de percée sérieuse avant au moins 5 ans. De plus, la concurrence venant des compagnies qui ont investi dans la recherche et le développement dans ce secteur depuis près d'une décennie sera intense. Pour ces raisons, on croit que ce secteur ne présente que très peu de possibilités, à court terme (0 à 5 ans), pour l'industrie canadienne; à moyen terme (5 à 10 ans) et à long terme toutefois (au-delà de 10 ans), on s'attend à ce que le potentiel du marché soit considérable. Quoi qu'il en soit, ce secteur commercial ne peut convenir qu'aux grandes compagnies qui sont déjà en relation avec les fabricants d'automobiles; seules les grandes compagnies peuvent faire les investissements soutenus à long terme qui sont nécessaires dans ce cas. Récemment, et pour aider à redresser leur position concurrentielle face au Japon, les fabricants américains ont non seulement entrepris de réduire le nombre de fournisseurs de pièce, mais encore ils ont exigé que ces derniers fassent leur propre recherche et développement et observent strictement les délais de livraison requis.

L'abondance de matières premières et le prix relativement bas des sources d'énergie offrent des occasions uniques aux fabricants de poudres céramiques d'élargir leur champ d'activités et à de nouvelles compagnies, particulièrement des entreprises de produits chimiques, de s'engager dans cette nouvelle voie. On considère que la réussite du Canada dans ce domaine sera particulièrement éclatante pour trois raisons : tout d'abord, il est très urgent de trouver des sources fiables de poudres céramiques bon marché pour réduire les dépenses globales de fabrication des néo-céramiques; deuxièmement, le Canada peut faire des progrès importants dans la mise au point de la technologie par des travaux de recherche et développement innovateurs ou par le transfert de la technologie; troisièmement, et ce qui est plus important, le nombre de fournisseurs engagés dans la production des poudres est relativement faible, et dans un marché en pleine croissance, d'autres producteurs peuvent trouver leur place.

Il faudra éliminer un certain nombre d'obstacles pour réussir à tirer réellement avantage des possibilités qu'on a déterminées. Les principaux obstacles sont les suivants :

- l'existence de la technologie requise ou la capacité de la mettre au point;
- la nécessité de pousser les compagnies multinationales à accroître leurs activités ou à créer de nouvelles entreprises;
- la nécessité d'aider les petites entreprises, déjà formées ou nouvelles, particulièrement dans la création des marchés;
- l'existence de la main-d'oeuvre technique requise.

L'existence de la technologie est peut-être le plus grand obstacle. Presque toute la technologie mise au point à l'étranger jusqu'ici est protégée par des brevets. La première étape à franchir sera donc de conclure des ententes d'utilisation sous licence pour obtenir le transfert de la technologie. A cause de ses ressources restreintes tant financières qu'en personnel technique, le Canada ne peut pas se permettre d'entreprendre un programme fondamental de recherche et de développement. Il faudra plutôt tenter de déterminer quelles sont les possibilités diverses les plus favorables et les exploiter.

Bien que le Canada ait une infrastructure de recherche et de développement assez bonne dans les universités, les organismes provinciaux de recherches et les laboratoires du gouvernement fédéral, il n'y a pas d'action concertée efficace faute d'objectifs à long terme reposant sur l'intérêt national, de planification adéquate, de coordination et de financement approprié. Cette situation n'a pas un

impact majeur sur les compagnies multinationales et les plus grandes entreprises canadiennes qui ont accès à la technologie que possède la compagnie mère ou qui ont conclu des ententes d'utilisation de la technologie sous licence. Toutefois, les petites entreprises, déjà formées ou nouvelles, qui pourraient le plus en tirer profit, n'ont généralement que des capacités limitées de recherche ou d'accès à la technologie; ces entreprises sont ainsi défavorisées.

La taille modeste du marché intérieur canadien des néo-céramiques, si on la compare à celles des États-Unis et du Japon, peut refreiner les investissements des multinationales au Canada. Toutefois, le pacte de l'automobile nord-américain, l'entente avec les États-Unis concernant les achats pour la défense, le prix relativement peu élevé de la main-d'oeuvre et une abondance d'énergie à faible coût peuvent avoir une influence considérable sur les investissements de ces compagnies au Canada.

Presque toutes les petites compagnies que nous avons rencontrées dans le cadre de la présente étude ont déclaré qu'il est relativement facile d'identifier les marchés mais que la création des marchés était onéreuse. Il faudrait établir des programmes d'aide financière pour élaborer et pénétrer les marchés.

L'existence de la main-d'oeuvre technique constitue un autre obstacle sérieux. Actuellement, il n'y a qu'une seule université qui décerne es diplômes en génie céramique. Il faudra se pencher sérieusement sur les moyens requis pour augmenter le nombre de techniciens compétents susceptibles d'aider l'industrie aussi bien que les organismes de recherche et de développement. L'université Queen's vient de créer un centre de technologie des matériaux de pointe; celui-ci représente l'effort conjoint fait par le capital de risque, l'industrie, l'université et le gouvernement pour encourager la recherche et le développement à l'échelle industrielle. On devrait favoriser cette activité et toute autre activité de groupe semblable.

Dans le cadre de l'Enterprise Ontario Program, le gouvernement de l'Ontario a annoncé la création d'un centre pour la commercialisation des matériaux industriels de pointe (y compris les néo-céramiques), à l'Ontario Research Foundation, avec une allocation de 10 millions de dollars pour trois ans. C'est là, sans aucun doute, une nouvelle qu'ont accueillie avec grande satisfaction les industries de l'Ontario.

A l'échelle nationale, le Canada dispose de trois avenues possibles pour encourager et consolider les activités liées aux néo-céramiques au Canada, tant dans les secteurs de fabrication que dans les organismes de recherche et de développement privés ou publics, à savoir :

- le Canada peut tenter de répondre aux besoins du secteur des néo-céramiques dans le cadre des programmes d'assistance existants;

° il peut élargir le cadre des activités actuelles en y ajoutant des dispositions spéciales;

° il peut, à l'instar du Japon, des États-Unis, de la République fédérale d'Allemagne, de la Suède et du Royaume-Uni, reconnaître l'importance des néo-céramiques pour le bien-être socio-économique du pays et adopter des programmes semblables.

La troisième solution est celle que nous recommandons. L'objectif fondamental de cette solution serait, avec le temps, d'atténuer la la vulnérabilité de l'économie canadienne par rapport aux progrès des États-Unis et du Japon, les chefs de file dans le secteur des néo-céramiques, pouvant avoir une influence sur le Canada. D'un autre côté, elle permettrait par contre de tirer avantage des possibilités d'aider l'industrie canadienne, particulièrement les petites entreprises déjà formées ou nouvelles. Les politiques et les programmes adoptés par le MCII au Japon, particulièrement le rôle de catalyseur du progrès industriel, sont unanimement reconnus comme étant les meilleurs au monde. Ils pourraient par conséquent servir de modèle pour l'élaboration et la mise en oeuvre des politiques et des programmes convenant le mieux au Canada et propres à combler ses besoins. Dans cet ordre d'idées, le gouvernement du Canada pourrait adopter un rôle de direction et de coordination pour :

a) élaborer et mettre en oeuvre un programme national comportant des objectifs techniques spécifiques pour se conformer aux besoins de l'industrie et du monde des affaires;

b) appuyer et coordonner les activités des laboratoires du gouvernement fédéral dans la réalisation des programmes spécifiques mentionnés à l'alinéa a);

c) recourir aux universités et aux organismes de recherches provinciaux pour appuyer les objectifs nationaux mentionnés à l'alinéa a) et pour aider l'industrie.

Nous suggérons, enfin, de mettre sur pied un conseil consultatif comprenant des représentants de l'industrie, des gouvernements et des universités pour déterminer et recommander les buts et les objectifs du programme national.

BIBLIOGRAPHIE

1. Bell, John — The New Ceramics Age Dawns, dans New Scientist, 26 janvier 1984, pp. 10-22.

2. Bowen, H. Kent et Joseph A. Pask — Learning from Japan's Developments High Technology Ceramics, dans Bul. Am. Ceram. Soc. 61 (9), 1982, pp. 916-918.

3. Burke, John J., Alvin E. Gorman et R. Nathan Katz (rédacteurs) — Ceramics for High performance Applications III, Reliability Plenum Press, (1983).

4. Charles River Associates — Technical and Economic Assessment of Advanced Ceramic Materials 1984 :
   Vol. 1 : Summary and Conclusions
   Vol. 2 : A Case Study of Ceramics in Heat Engine Applications
   Vol. 3 : A Case Study of Ceramic Capacitors
   Vol. 4 : A Case Study of Integrated Optic Devices
   Vol. 5 : A Case Study of Ceramic Toxic and Combustible Gas Sensors
   Vol. 6 : A Case Study of Ceramic Cutting Tools

5. Chirin, C.M. — Advanced Industrial Materials in Japan, août 1983.

6. Evans. A.G. — Technical and Scientific Assessment of the Reliability of Advanced Ceramics, rapport préparé pour le National Bureau of Standards, juillet 1982.

7. Fukunga, Osamu et Yusuke Morisyoshi — Research at Japanese National Laboratories, Laboratories ", dans Bul. Am. Ceram. Soc. 61 (9), 1982, pp. 923-925.

8. Harmon, Robert A. et Charles W. Beardsley — Ceramics Heat Up, dans Mechanical Engineering, mai 1984, pp. 22-43.

9. Hatch Associates Ltd., — Assessment of the Needs and Opportunities in Advanced Materials Technologies, Toronto, avril 1984.

10. Iwata, Seiji — R & D on High Technology Ceramics in Japanese Industries, dans Bul. Am. Ceram. Soc. 61 (9), 1982, pp. 926-928.

11. Johnson, L.R. et A.P.S. Teotia — A Structural Ceramic Research Program: A Preliminary Economic Analysis Report No. ANL/CNSV-38, mars 1983, Argonne National Laboratory (commandité par le ministère de l'énergie).

12. Kenny, George B. et H. Kent Bowen — High-Tech Ceramics in Japan: Current and Future Markets, dans Bul. Am. Ceram Soc. 62 (5), 1983, pp. 590-596.

13. Kingery, W.D. et H.K. Bowen — Introduction to Ceramics, 2e édition, John Wiley & Sons, 1976.

14. Leone, Edward M., R. Nathan Katz et John J. Burke (rédeacteurs) — Ceramics for High Performance Applications III, Reliability Plenum Press, 1983.

15. McLean, Arthur F. — Ceramic Technology for Automotive Turbines, dans Bul. Am. Ceram. Soc. 61 (8), pp. 861-871, (1982).

16. Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, Ottawa — Ceramic Plants in Canada, Operators List 6, 1975.

17. Mueller, James I. — U.S. Needs Ceramic Program for Heat Engines, dans Ceramic Industry, mai 1984, pp. 22-25.

18. Naito, R. — Aspects of Japanese Ceramic Industry, dans J. British Ceram Soc. 6 (1), 1969.

19. National Academy of Sciences, National Research Council Washington, D.C. — High-Technology Ceramics in Japan, 1984.

20. Oak Ridge National — Ceramic Technology for Advanced Heat Engines, Program Plan ORNL/TM-8896, juin 1984.

21. Riley, F.L. (rédacteur) — Progress in Nitrogen Ceramics, NATO ASI Series, Martinus Nijhoff Publishers, 1983.

22. Saito, Shinroku — The Current Outlook for Japanese Ceramics, dans Bul. Am. Ceram. Soc.

23. Sanders, Howard J. — High-Tech Ceramics, dans Chemical & Engineering News, juillet 1984, pp. 26-40.

24.	Shishido, Toshio	Japanese Industrial Development and Policies for Science and Technology, dans Science, vol. 219, 1983, pp. 259-264.
25.	Skaggs, S.R.	Report on Trip to Japan, Los Alamos National Laboratory, mai 1982.
26.	The Long Term Credit Bank of Japan, Ltd.	Japan's High Technology Industries (2), février 1984.
27.	The Ministry of International Trade and Ministry	Report of the Working Group on Fine Ceramics and Fundamental Issues, mai 1984.
28.	U.S. Commerce Department	A Competitive Assessment of the U.S. Advanced Ceramics Industry, ministère du Commerce des États-Unis, PB84-162288, mars 1984.
29.	Yanagida, Hiroaki et Mitsue Koizumi	Major Ceramic Research Programs Sponsored by the Japanese Government, dans Bul. Am. Ceram. Soc. 61 (9), 1982, pp. 929-939.
30.	Yano Research Institute Ltd.	New Ceramics Market in Japan, août 1982.

ANNEXE A

Agences et laboratoires gouvernementaux,

entreprises industrielles et universités

visités en Europe, au Japon et aux États-Unis

	Institution	Nom et poste
1	Imperial College of Science and Technology Londres, Angleterre	M. P.S. Rogers Directeur adjoint Département de métallurgie
2	Morgan-Matroc Ltd. Stourport-on-Severn, Angleterre	M. B.G. Newland Directeur technique
3	British Ceramic Research Association Penkhull, Stoke-on-Trent, Angleterre	M. David Loyd Chef, néo-céramiques
4	Université de Newcastle Newcastle-upon-Tyne, Angleterre	M. K.H. Jack Département de métallurgie
5	Université de Leeds Leeds, Angleterre	M. R.J. Brook Chef, département de céramique
6	UK Atomic Energy Research Establishment Harwell, Angleterre	M. D.T. Livey Chef, division des matériaux M. Davidge Chef, division des céramiques
7	Laboratoire de recherches Desmarquest Trappes, France	M. Jean-Paul Torre Chef du laboratoire
8	Université Paris Sud-Orsay, Paris, France	M. Jean Phillibert C.N.R.S.
9	École nationale supérieure de céramique industrielle Limoges, France	M. Philippe Boch Directeur
10	ASEA Cerma Robertsfors, Suède	M. Hans Larker Directeur
11	Sandvik Hard Materials Stockholm, Suède	M. Ernst Ake Nylander Directeur de la recherche
12	Svensk Silikatforsknings-institutet Gothberg, Suède	M. Roger Carlsson Directeur
13	Bundesministerium für Forschung und Technologie Bonn, République fédérale d'Allemagne	M. Daniel Widdershoven Regierungsdirector

	Institution	Nom et poste
14	Deutsche Forschungs - und Versuchanstalt für Luft - und Raumfahrt e. V. Cologne, République fédérale d'Allemagne	M. Ziegler Abteilungsleiter M. Wolfgang Braue
15	Electroschmelzwerk Kempten GMBH Munich, République fédérale d'Allemagne	M. Alfred Lipp Prokurist und Leiter der Erntwicklung M. George Rabini Directeur général des ventes
16	SIGRI Elektrographit GMBH Meitingen, République fédérale d'Allemagne	M. Hugo Eicher Directeur général M. Werner Klose Directeur technique
17	Daimler Benz A.G. Stuttgart, République fédérale d'Allemagne	M. Klaus Morgenthaler Chef, groupe de la céramique
18	Max Planck Institut für Metallforschung Institut für Werkstoffwissenschaften Stuttgart, République fédérale d'Allemagne	M. P. Greil M. N. Clausen
19	Volkswagenwerk Wolfsburg, République fédérale d'Allemagne	M. Langer Ingénieur principal
20	H.C. Starck Co. Goslar, République fédérale d'Allemagne	M. G. Schwier Directeur technique
21	Toshiba Ceramics Co. Ltd. Tokyo, Japon	M. Hideo Nagashima Directeur M. K. Ban Chef, Administration technique
22	Toshiba Corporation Tokyo, Japon	M. Ken-Ichiro Ando Directeur principal M. Katsutoshi Komeya Chef de la recherche

	Institution	Nom et poste
23	Showa Denko, K.K. Tokyo, Japon	M. Junichi Sato Directeur adjoint
		M. Yoshitaka Directeur technique
24	NGK Insulators Ltd. Nagoya, Japon	M. Iwao Kikoto Directeur général
		M. M. Okuba Directeur, planification
		M. Tsuneji Izumi Directeur
25	NGK Spark Plug Co. Ltd. Nagoya, Japon	M. Isamu Fukura Directeur
		M. Takehiko Kato Directeur adjoint, recherche
26	Kobe Steel Ltd. Kobe, Japon	M. Nobuyasu Kawai Directeur, nouveaux matériaux
		M. Hiroshi Takigawa Métallurgiste principal
		M. K. Homma Ingénieur en céramique
27	Murata Manufacturing Co. Ltd. Kyoto, Japon	M. Kikuo Wakino Directeur général
28	Ube Industries Ube, Japon	M. Tadashi Iwai Directeur, recherches en céramique
		M. Hiroyuki Asade Directeur associé
29	Université d'Osaka Osaka, Japon	M. Mitsue Koizumi Professeur des sciences minérales
		M. Yosinari Miyamoto Professeur associé

	Institution	Nom et poste
30	Ministère du Commerce international et de l'industrie (MCII) Tokyo, Japon	M. Yoshihiro Adachi Directeur, bureau des céramiques fines M. Shina Aoki Agent principal, technologie fondamentale
31	Association de technologie industrielle du Japon (JITA) Tokyo, Japon	M. M. Suzuki Directeur général
32	Association de recherches techniques sur les céramiques à rendement élevé Tokyo, Japon	M. Kiyoshi Nakamura Directeur général M. Akio Nagahiro Directeur
33	Agence des sciences et de la technologies (STA) Tokyo, Japon	M. Yukio Sato Directeur, Bureau des matériaux, des sciences et de la technologie
34	Institut national de recherches sur les matériaux inorganiques (NIRIM) Sakura-Mura, Niihari-Gun, Ibaraki, Japon	M. Masaru Goto Directeur général M. Yoshiro Inomata Chef, groupe du SiC
35	Institut gouvernemental de recherches industrielles (GIRI) Nagoya, Japon	M. Shunji Nagase Directeur M. Eiichi Nagase Directeur, génie céramique
36	Ford Motor Company Laboratoire scientifique Dearborn, Michigan, États-Unis	M. Thomas J. Whalen Chef de la recherche M. John A. Mangels Ingénieur en céramique M. Morton E. Milburg Chercheur principal

	Institution	Nom et poste
37	Centre de recherches sur la céramique/Université d'état du New-Jersey Piscataway, N.J., États-Unis	M. J.B. Wachtman Directeur M^{me} Lisa C. Klein Professeur associé
38	National Bureau of Standards Gaithersberg, Md., États-Unis	M. Samuel J. Schneider Chef adjoint, Division des matériaux inorganiques M. Sheldon M. Widerhorn Chercheur principal
39	Académie nationale des sciences Conseil de recherche national Washington, D.C., États-Unis	M. Richard M. Spriggs Chef du personnel de recherche
40	SRI International Menlo Park, CA., États-Unis	M. Gerald Shroff Directeur, matériaux et travail des métaux

ANNEXE B

Liste des personnes qui ont
participé aux entretiens
au Canada

	Organisme	Nom et Poste
1	Université McMaster Hamilton (Ontario)	M. P.S. Nicholson Professeur, département de la métallurgie et de la science des matériaux
2	Université Queen's Kingston (Ontario)	M. R.W. Smith Professeur et chef du département de génie métallurgique
		M. M. Sayer Professeur, département de physique
3	Université de la Colombie-Brittanique Vancouver (Colombie-Britannique)	M. A.C.D. Chalklader Professeur, département de génie métallurgique
4	Université de Toronto Toronto (Ontario)	M. D. Barham Professeur, département de génie chimique
5	B.M. Hitech Inc. Collingwood (Ontario)	M. E. Prasad Directeur général
6	Electrofuel Manufacturing Co. Toronto (Ontario)	M. Shankar Das Gupta Président
7	Hamilton Porcelains Limited Brantford (Ontario)	M. A. Mason Président
8	EYC Technical Ceramics Inc. Espanola (Ontario)	M. Robert G. McEwen Directeur des projets
9	Alcan International Ltd. Kingston (Ontario)	M. Raman R. Sood Directeur de la recherche
10	Ontario Research Foundation Sheridan Park, Mississauga (Ontario)	M. J. Johnston Vice-Président Développement du commerce
11	Sandvik Canada Corp. Mississauga (Ontario)	M. E.A. Thompson Directeur
12	Iron Ore Co. of Canada Sept-Iles (Québec)	M. Bis Chanda Chef, projets spéciaux

	Organisme	Nom et Poste
13	Ontario Centre for Automotive Parts Technology St. Catharines (Ontario)	M. George A. Lacy Président
14	Litton Systems Canada Toronto (Ontario)	M. A. Baryani
15	Conseil national de recherches Ottawa (Ontario)	M. W. Wallace Chef, structures et matériaux
16	Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources Ottawa (Ontario)	M. K.E. Bell Chef, section de la céramique M. T.A. Wheat Chercheur
17	Bell Northern Research Ottawa (Ontario)	M. W. Westwood
18	Metco Canada Division Perkin-Elmer (Canada) Limited Rexdale (Ontario)	M. B. Royea Directeur des ventes
19	International Cutting Tools Inc. Montréal (Québec)	M. A. Minicozzi
20	Canadian Corporate Management Ltd. Toronto (Ontario)	M. W. Irwin Directeur technique
21	Kenrock Tools Inc. Toronto (Ontario)	M. Justin Chan
22	Lamage, Division of J.K.S. Industries North Bay (Ontario)	M. John Nicols

	Organisme	Nom et Poste
23	Valenite Madco Inc. Windsor (Ontario)	M. B.N. Slugs
24	J.K.S. Boyles International Inc. Toronto (Ontario)	M. John McGibbon
25	Home Technics Ltd.	M. Karl A. Kappes
26	CRIQ	M. F. Dugal Directeur Division des matériaux et des procédés
27	IBM	M. R. Champagne
28	Epitek Electronics	M. S. Tasker
29	Almax Industries (1980) Ltd.	M. Kamal El Assal
30	Université technique de Nouvelle-Écosse	M. H. King
31	Pyrotanax	M. T. Tymowski
32	Galtwood Tools	M. A. Milton Directeur des ventes